

Redução do Coeficiente de Arrasto sobre Trens Double Stack

L.H. Hungria, & G. Soares & F. Mendes

Rumo S.A., Curitiba, Paraná, Brasil

Resumo: Esse artigo mostra dois cenários: trens intermodais double stack 40' com e sem defletores. O objetivo desse trabalho é comparar a diferença do coeficiente de arrasto para ambos os cenários e qual o impacto no consumo de combustível. Para determinar o coeficiente de arrasto, foi feita a análise a partir do CFD, e através da equação de W.J. Davis, foi possível obter as resistências principais que determinam o esforço de tração e, conseqüentemente, a potência, para então apresentar a melhor opção, utilizando defletores, que economize combustível de maneira significativa.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo desse artigo é determinar o coeficiente de arrasto para o modelo de trem proposto: ele consiste em vagões double stack de 40', chamados também de vagões PRT e uma locomotiva AC 44. Como esses vagões são mais altos do que a locomotiva, a área frontal (A) do primeiro vagão terá 4 m² a mais e um espaçamento de 7,4 m entre eles, a uma velocidade média de 22 m/s. Na figura 1, temos duas situações: a primeira, o trem em sua condição original. Já, na segunda, foram usados defletores (D), baseado no trabalho de W.A. Kennedy, com o intuito de diminuir o coeficiente de arrasto. A equação de W.J. Davis foi utilizada em ambas as condições.

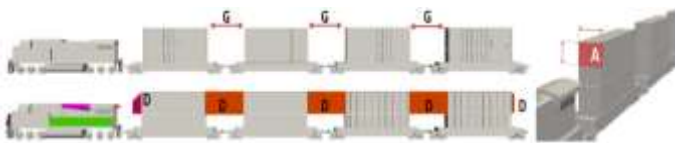


Figura 1. Dois cenários: com defletores e sem defletores.

Um trem está sujeito a três resistências principais, a de rampa (R_g), a de curva (R_c) e a de Davis (R_D), sendo a de Davis, composta por três partes: Resistência ao rolamento ($R_{D1} = a$), à fricção ($R_{D2} = bV$) e resistência do ar ($R_{D3} = cV^2$), onde pode ser resumida através da seguinte fórmula: $R_D = a + bV + cV^2$ (Barkan, 2010).

Considerando que o trem somente ganha velocidade (V) quando está em nível ($i = 0\%$) e em tangente ($R_c = \infty$), as resistências de Davis se tornam as principais.

O terceiro termo da equação (cV^2) cresce quadraticamente em relação à velocidade, o qual

tem grande participação em termos de resistência ao movimento acima de 16,5 m/s.

Na figura 2, temos o gráfico que apresenta o comportamento das resistências de Davis em relação à velocidade. A área detalhada na parte c (cV^2), refere-se à faixa de velocidade (21 m/s a 22,8 m/s) a qual será analisada nesse estudo, pois a partir de 21 m/s, o termo cV^2 tem uma grande participação.

O termo cV^2 da equação, pode ser referido como: $R_{D3} = c \cdot A \cdot V^2$, onde "c" representa o coeficiente de arrasto a ser obtido.

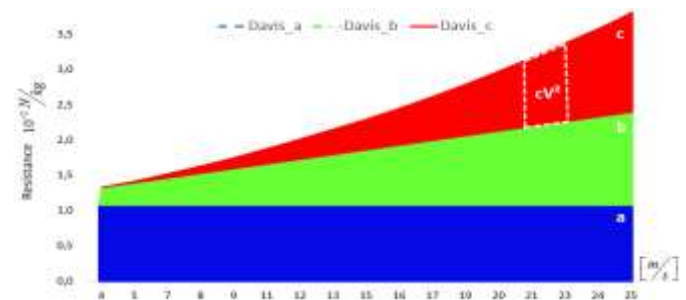


Figura 2. Resistências x velocidade – Área estudada: cV^2 .

Sendo possível a redução do coeficiente de arrasto do terceiro termo da equação de Davis, o esforço de tração (E_t) necessariamente diminuirá.

Desta forma é obtida uma redução na potência e, conseqüentemente, também uma redução no consumo de combustível (C).

Para determinar o coeficiente de arrasto nas situações com e sem defletores, é necessário usar a ferramenta computacional CFD (Computational Fluid Dynamics).

O CFD apresenta uma fácil visualização das regiões de escoamento turbulento, como mostra a Figura 3, e calcula também os coeficientes de arrasto locais e de todo o trem.

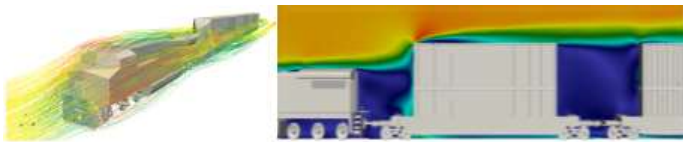


Figura 3. Uso do CFD para encontrar o coeficiente de arrasto (Tauflow, 2018).

2 METODOLOGIA, HIPÓTESES E DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada, segue a sequência apresentada abaixo:



Figura 4. Fluxo simplificado.

Para a análise, algumas condições de contorno foram assumidas:

- Via em nível ($i = 0\%$);
- Velocidade média de 22 m/s;
- Linha tangente ou raio de curva = ∞ ;
- Material rodante em dois cenários: sem defletores (condição 1) e com defletores (condição 2).

A vazão horária de combustível (Tabela 1) é fornecida pelo fabricante da locomotiva e baseia-se no ponto de aceleração (ponto da locomotiva) que corresponde à potência disponível. Será usada no cálculo de consumo de combustível.

Tabela 1. Consumo horário de combustível.

Ponto da locomotiva	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
Consumo (litro/h)	44	101	206	298	415	530	643	792

2.2 Localização dos defletores

Os defletores são dispostos sobre a locomotiva e sobre os vagões, de maneira a minimizar o coeficiente de arrasto. São distribuídos da seguinte forma: quatro deles para a locomotiva e 3 para os vagões, Kennedy (2010), como na (Figura 5).

O propósito é obter o coeficiente de arrasto dos vagões (c_v) e da locomotiva (c_L), com e sem defletores, através da ferramenta CFD, para que seja possível o cálculo do esforço de tração para

ambas as configurações. Com o esforço de tração e a velocidade conhecidos, é possível calcular a potência (P) e, assim, obter o consumo de combustível (C). Seguindo a metodologia já apresentada, três possíveis situações aparecem, como explicado a seguir.

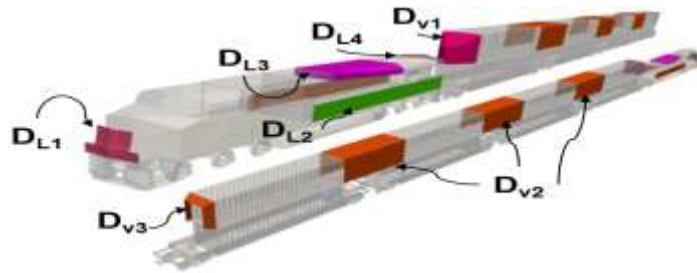


Figura 5. Posição dos defletores.

3 SITUAÇÕES POSSÍVEIS

3.1 Situação 1

Se o esforço de tração (E_t) diminuir, para uma determinada velocidade do trem (V), gerando uma diferença de potência (P) menor do que a diferença entre dois pontos de aceleração, o trem então ganhará velocidade pois a potência permanecerá constante:

$$\Delta C = c \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$t_2 < t_1 \Rightarrow C_2 < C_1 \Rightarrow \Delta C < 0 \text{ (reduziu)}$$

Onde c = vazão horária de combustível (litros/hora), t = tempo (h).

3.2 Situação 2

Se houver uma redução de esforço de tração (E_t), com a velocidade (V) constante, gerando uma variação na potência (ΔP) maior do que a diferença entre os dois pontos da locomotiva, o maquinista poderá diminuir a potência e com isto, mudar o consumo horário \dot{c} para uma vazão menor \dot{c}_{i-1} , reduzindo o consumo de combustível C conforme a Equação 2:

$$\Delta C = (\dot{c}_{i-1} - \dot{c}_i) \cdot t \quad (2)$$

$$\text{Onde } \dot{c}_{i-1} < \dot{c}_i \Rightarrow C_2 < C_1 \Rightarrow \Delta C < 0 \text{ (reduziu)}$$

Lembrando que o tempo de circulação (t) será o mesmo, se a velocidade se mantiver constante.

3.3 Situação 3

Se a redução do esforço de tração (E_t), para uma determinada velocidade do trem (V), gerar uma variação na potência (ΔP) menor do que a diferença entre dois pontos de aceleração, e mesmo assim, o maquinista diminuir o ponto de aceleração, ou seja,

a potência do trem; em consequência, a velocidade do trem diminuirá, para a mesma distância (l), e, portanto, o tempo de circulação aumentará, mas haverá economia de combustível, conforme a equação 3:

$$\Delta C = \dot{c}_{i-1} \cdot t_2 - \dot{c}_i \cdot t_1 \quad (3)$$

$$\text{Se } (\dot{c}_{i-1} \cdot t_2) < (\dot{c}_i \cdot t_1) \Rightarrow C_2 < C_1 \Rightarrow \Delta C < 0 \quad (\text{reduziu})$$

Parte do combustível economizado será devido à redução do esforço de tração e parte devido à redução da velocidade.

Agora, detalhando as três situações acima, relações matemáticas servirão de base para demonstrar os resultados considerando as premissas adotadas. E, além disso, ficará evidente a participação de cada termo das resistências de Davis.

4 ANÁLISE MATEMÁTICA

4.1 Situação 1: Potência constante.

4.1.1 Condição 1: Raio de curva $R_c = \infty$ e rampa $i = 0\%$

$$P = E_t \cdot V$$

$$E_t = L \cdot [10 \cdot i + R'_{Dv} + R'_{Cv}] + M_L \cdot [10 \cdot i + R'_{DL} + R'_{CL}]$$

Onde L = peso bruto dos vagões; M_L = massa total das locomotivas; R'_{Dv} = resistência unitária de Davis para vagão. Aplicando as condições:

$$P_i = \{L \cdot [10 \cdot i + R'_{Dv} + R'_{Cv}] + M_L \cdot [10 \cdot i + R'_{DL} + R'_{CL}]\} \cdot V, \text{ onde o índice } i = 1 \text{ a } 8.$$

$$P_i = (L \cdot R'_{Dv} + M_L \cdot R'_{DL}) \cdot V \quad (4)$$

$$P_i = [L \cdot (R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3})_v + M_L \cdot (R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3})_L] \cdot V$$

Considerando $V > 17,78$ m/s, as resistências unitárias de Davis R'_{D1} e R'_{D2} perdem importância com o aumento da velocidade, enquanto R'_{D3} , devido à resistência do ar, aumenta sua participação.

Considerando que houve o melhoramento do coeficiente de arrasto de c_1 para c_2 onde $c_2 < c_1$:

- Fazendo o coeficiente de arrasto $c = c_1$ para uma dada velocidade:

$$P_{i_1} = \left\{ L \cdot [R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3}(c_1)]_v + M_L \cdot [R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3}(c_1)]_L \right\} \cdot V \quad (5)$$

- Fazendo o coeficiente de arrasto $c = c_2$ para uma dada velocidade:

$$P_{i_2} = \left\{ L \cdot [R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3}(c_2)]_v + M_L \cdot [R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3}(c_2)]_L \right\} \cdot V \quad (6)$$

Como $c_1 > c_2$, então $P_{i_1} > P_{i_2}$. Fazendo ΔP como sendo a diferença entre as equações (6) e (5):

$$\Delta P = P_{i_2} - P_{i_1} \quad (7)$$

Se o coeficiente de arrasto for reduzido, para o mesmo ponto de aceleração (N_i), a resistência de Davis ao ar irá diminuir, demandando um menor esforço de tração da locomotiva. Se a velocidade do trem for mantida, a potência necessária será menor e o maquinista deverá reduzir o ponto da locomotiva (N_{i-1}). Consequentemente, a equação 7 dará um resultado negativo. Mas, como o ponto da locomotiva (N_i) será mantido pelo maquinista ($P = \text{constante}$), e o esforço de tração cairá, a velocidade vai aumentar, e, portanto, crescerá o segundo e terceiro termos da resistência de Davis: $R'_{D2} = f(V)$ e $R'_{D3} = f(V^2)$, os quais dependem da velocidade do trem.

Como a participação da resistência R'_{D2} fica estabilizada, considera-se somente R'_{D3} como dependente do aumento da velocidade.

Representando por (P) a potência gasta com o primeiro e segundo termos da equação de Davis e mantendo a velocidade do trem (V) constante:

$$P = [L \cdot (R'_{D1} + R'_{D2})_v + M_L \cdot (R'_{D1} + R'_{D2})_L] \cdot V \quad (8)$$

Considerando a equação 5 e $V = V_1$ somente para a resistência do ar:

$$P_{i_1} = [L \cdot (R'_{D1} + R'_{D2})_v + M_L \cdot (R'_{D1} + R'_{D2})_L] \cdot V + [L \cdot R'_{Dv3}(c_1, V_1) + M_L \cdot R'_{DL3}(c_1, V_1)] \cdot V_1$$

$$P_{i_1} = P + [L \cdot R'_{Dv3}(c_1, V_1) + M_L \cdot R'_{DL3}(c_1, V_1)] \cdot V_1 \quad (9)$$

Considerando a equação 6 e $V = V_2$ somente para a resistência do ar:

$$P_{i_2} = [L \cdot (R'_{D1} + R'_{D2})_v + M_L \cdot (R'_{D1} + R'_{D2})_L] \cdot V + [L \cdot R'_{Dv3}(c_2, V_2) + M_L \cdot R'_{DL3}(c_2, V_2)] \cdot V_2$$

$$P_{i_2} = P + [L \cdot R'_{Dv3}(c_2, V_2) + M_L \cdot R'_{DL3}(c_2, V_2)] \cdot V_2 \quad (10)$$

Substituindo (9) e (10) em (7):

$$\Delta P = L \cdot [R'_{Dv3}(c_2, V_2) \cdot V_2 - R'_{Dv3}(c_1, V_1) \cdot V_1] + M_L \cdot [R'_{DL3}(c_2, V_2) \cdot V_2 - R'_{DL3}(c_1, V_1) \cdot V_1] \quad (11)$$

Mas ΔP deverá ser igual a zero, pois foi mantido o ponto de aceleração (N_i), porém a velocidade aumentará de V_1 para V_2 :

$$\Delta C = \dot{c}_i \cdot t_2 - \dot{c}_i \cdot t_1 = \dot{c}_i \cdot (t_2 - t_1) = \dot{c}_i \cdot \left(\frac{l}{V_2} - \frac{l}{V_1} \right) = \dot{c}_i \cdot l \cdot \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1 \cdot V_2} \right) \quad (12)$$

Como $V_2 > V_1$, a variação do consumo ΔC será negativa, indicando que houve economia de combustível, já que a distância (l) foi percorrida em um tempo menor $t_2 < t_1$.

4.1.2 Condição 2: em curva, em nível $i = 0\%$ e $R'_{D2} = bV$

$$P_i = \{L \cdot [10i + R'_{Dv} + R'_{Cv}] + M_L \cdot [10i + R'_{DL} + R'_{CL}]\} \cdot V$$

Como o trem perde muita velocidade quando em rampa, não faz sentido considerar rampa:

$$P_i = \{L \cdot [R'_{Dv} + R'_{Cv}] + M_L \cdot [R'_{DL} + R'_{CL}]\} \cdot V \quad (13)$$

Aplicando a equação (13) para as velocidades (1) e (2):

$$P_{i_1} = \{L \cdot [R'_c + R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3}(c_1)]_v + M_L \cdot [R'_c + R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3}(c_1)]_L\} \cdot V_1$$

$$P_{i_2} = \{L \cdot [R'_c + R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3}(c_2)]_v + M_L \cdot [R'_c + R'_{D1} + R'_{D2} + R'_{D3}(c_2)]_L\} \cdot V_2$$

Separando os termos dependentes da velocidade daqueles que são independentes:

$$P_{i_1} = \{L [R'_c + R'_{D1}]_v + M_L [R'_c + R'_{D1}]_L\} \cdot V_1 + \{L [R'_{D2}(V_1) + R'_{D3}(c_1, V_1)]_v + M_L [R'_{D2}(V_1) + R'_{D3}(c_1, V_1)]_L\} \cdot V_1$$

$$P_{i_2} = \{L [R'_c + R'_{D1}]_v + M_L [R'_c + R'_{D1}]_L\} \cdot V_2 + \{L [R'_{D2}(V_2) + R'_{D3}(c_2, V_2)]_v + M_L [R'_{D2}(V_2) + R'_{D3}(c_2, V_2)]_L\} \cdot V_2$$

Aplicando a equação (7) e considerando o primeiro termo do lado direito das equações anteriores dependentes apenas linearmente da velocidade: $V_1 \cong V_2 = V$.

$$\Delta P = L \cdot [R'_{D2}(V_2) \cdot V_2 - R'_{D2}(V_1) \cdot V_1]_v + L \cdot [R'_{D3}(c_2, V_2) \cdot V_2 - R'_{D3}(c_1, V_1) \cdot V_1]_v + M_L \cdot [R'_{D2}(V_2) \cdot V_2 - R'_{D2}(V_1) \cdot V_1]_L + M_L \cdot [R'_{D3}(c_2, V_2) \cdot V_2 - R'_{D3}(c_1, V_1) \cdot V_1]_L \quad (14)$$

A equação anterior tem quatro termos do lado direito. Dependendo do sinal de cada um desses termos, três possíveis variações na potência poderão acontecer:

- I. $\Delta P > 0$: positivo, aumento da potência. Esta situação não é possível, pois o trem já estará no ponto 8. Para manter a potência, com um esforço de tração maior, a velocidade do trem irá diminuir;

- II. $\Delta P = 0$: nulo, se houver redução no esforço trator, terá um aumento da velocidade;
- III. $\Delta P < 0$: negativo, diminuiu, já que o esforço trator necessário é menor.

- a) Se o ponto 8 da locomotiva for mantido, a velocidade, conseqüentemente aumentará;

$$P = E_t \downarrow V \uparrow = \text{constante} \Rightarrow V_2 > V_1$$

Isso só acontecerá quando $|\Delta P| < P_8 - P_7$

- b) Se o ponto da locomotiva (N_i) é reduzido de 8 para 7 e a velocidade permanece constante: $V_2 = V_1$, somente quando: $|\Delta P| \geq P_8 - P_7$
- c) Se o ponto da locomotiva cair de 8 para 7 e $|\Delta P| < P_8 - P_7$: a velocidade também vai cair: $V_2 < V_1$

Substituindo as equações que representam as resistências R'_{D2} e R'_{D3} , na equação (14) e também lembrando que: $L = n_v \cdot P_v$ e $M_L = n_L \cdot P_L$

$$\Delta P = L \cdot [b \cdot V_2^2 - b \cdot V_1^2]_v + L \cdot \left[\frac{c_{v_2} \cdot A_v \cdot V_2^2}{P_v} \cdot V_2 - \frac{c_{v_1} \cdot A_v \cdot V_1^2}{P_v} \cdot V_1 \right]_v + M_L \cdot [b \cdot V_2^2 - b \cdot V_1^2]_L + M_L \cdot \left[\frac{c_{L_2} \cdot A_L \cdot V_2^2}{P_L} \cdot V_2 - \frac{c_{L_1} \cdot A_L \cdot V_1^2}{P_L} \cdot V_1 \right]_L, \text{ onde } n_v = \text{número de vagões e } n_L = \text{número de locomotivas.}$$

$$\Delta P = (L \cdot b_v + M_L \cdot b_L) \cdot (V_2^2 - V_1^2) + n_v \cdot A_v \cdot (c_{v_2} \cdot V_2^3 - c_{v_1} \cdot V_1^3) + n_L \cdot A_L \cdot (c_{L_2} \cdot V_2^3 - c_{L_1} \cdot V_1^3) \quad (15)$$

4.1.3 Condição 3: Desconsiderando as variações em $R'_{D2}(L, v)$ e $R'_{D3}(L)$

$\Delta P = n_v \cdot A_v \cdot (c_{v_2} \cdot V_2^3 - c_{v_1} \cdot V_1^3)$, onde não há variação na potência ($\Delta P = 0$):

$$c_{v_2} \cdot V_2^3 = c_{v_1} \cdot V_1^3 \Rightarrow V_2 = V_1 \sqrt[3]{\frac{c_{v_1}}{c_{v_2}}}$$

$c_v \cdot V^3 = \text{constante} \Rightarrow$ com a redução de c_v , a velocidade aumentará um pouco, pois ela varia cubicamente.

4.2 Situação 2: Trem com velocidade constante

4.2.2 Condição 1: Redução da potência = $P_{i-1} - P_i$ e velocidade constante.

Se houver uma redução considerável do esforço de tração, mantendo a velocidade do trem, o ponto da locomotiva poderá ser reduzido. Os parâmetros seguintes não variam, pois não são dependentes da velocidade:

$$R'_g; R'_c; R'_{D1} \Rightarrow \text{Vagões e locomotivas}$$

- Considerando o coeficiente de arrasto $c = c_1$ e mantendo a velocidade constante:

$$P_i = \left\{ L \cdot [R'_g + R'_c + R'_{D_1} + R'_{D_2} + R'_{D_3}(c_1)]_v + M_L \cdot [R'_g + R'_c + R'_{D_1} + R'_{D_2} + R'_{D_3}(c_1)]_L \right\} \cdot V \quad (16)$$

- Considerando o coeficiente de arrasto $c = c_2$ e a velocidade mantida constante:

$$P_{i-1} = \left\{ L \cdot [R'_g + R'_c + R'_{D_1} + R'_{D_2} + R'_{D_3}(c_2)]_v + M_L \cdot [R'_g + R'_c + R'_{D_1} + R'_{D_2} + R'_{D_3}(c_2)]_L \right\} \cdot V \quad (17)$$

Como $c_1 > c_2$, então $P_i > P_{i-1}$. Fazendo ΔP como sendo as diferenças entre as equações (17) e (16):

$$\Delta P = P_{i-1} - P_i \quad (18)$$

$$\Delta P = L \cdot [R'_{D_{v_3}}(c_2) - R'_{D_{v_3}}(c_1)] \cdot V + M_L \cdot [R'_{D_{L_3}}(c_2) - R'_{D_{L_3}}(c_1)] \cdot V \quad (19)$$

4.2.3 Condição 2: Considerando que não haverá mudança no coeficiente de arrasto das locomotivas:
 $c_{L1} = c_{L2}$

$$\Delta P = L \cdot \left[\frac{c_{v_2} \cdot A_v \cdot V^2}{P_v} - \frac{c_{v_1} \cdot A_v \cdot V^2}{P_v} \right] \cdot V$$

$$\Delta P = n_v \cdot A_v \cdot (c_{v_2} - c_{v_1}) \cdot V^3 = n_v \cdot A_v \cdot \Delta c_v \cdot V^3 \quad (20)$$

Para P_i o consumo será \dot{c}_i e para P_{i-1} o consumo será \dot{c}_{i-1} . A redução do consumo é dada por (21):

$$\Delta \dot{c} = \dot{c}_{i-1} - \dot{c}_i \Rightarrow \Delta C = (\dot{c}_{i-1} - \dot{c}_i) \cdot t = (\dot{c}_{i-1} - \dot{c}_i) \cdot \frac{l}{V} \quad (21)$$

4.3 Situação 3: Mudança na potência e na velocidade.

4.3.1 Condição: redução na potência = $P_{i-1} - P_i$ e redução na velocidade $V_2 < V_1$.

Isolando a variável velocidade final das resistências ao movimento, é obtida a equação (22), uma equação de terceiro grau. A velocidade final dependerá da potência, do tempo disponível e do coeficiente de arrasto de vagões e locomotivas.

$$av_f^3 + bv_f^2 + cv_f + d = 0 \quad (22)$$

$$a = 1; b = \frac{a' + c'}{a'} + 2v_i; c = \frac{b' + (c' - a')v_i}{a'} + v_i^2; d = -\frac{746 k_i P_3}{g}$$

Onde:

$$a' = \frac{M_t}{gt}; c' = \frac{n_L P_L b_L + n_v P_v b_v}{2}; d' = \frac{n_L P_L c_L + n_v P_v c_v}{4}$$

$$b' = 10i + R_c(L, v) + n_L P_L a_L + n_v P_v a_v = R_{c_L} + R_{c_v} + n_L P_L a_L + n_v P_v a_v$$

$$\text{Notar que: } R'_{D_v} = (a + bv + cv^2)_v; R'_{D_L} = (a + bv + cv^2)_L$$

Para obter a solução da equação acima, é utilizada a equação (23): Hungria (2017).

$$v_{f_1} = \left(-\frac{q}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{q^2 + \frac{4p^3}{27}} \right)^{1/3} + \left(-\frac{q}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{q^2 + \frac{4p^3}{27}} \right)^{1/3} - \frac{b}{3a}$$

$$\text{Onde: } p = \frac{c}{a} - \frac{b^2}{3a^2} \text{ e } q = \frac{2b^3}{27} - \frac{bc}{3} + d \quad (23)$$

A equação (23) só é usada quando a variação $\Delta = q^2 + \frac{4p^3}{27}$ for maior ou igual a zero.

Quando o discriminante for menor que zero, a equação (24) deverá ser utilizada:

$$v_{f_1} = 2 \sqrt{-\frac{p}{3}} \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \cdot \arccos \left(-\frac{q}{2} \cdot \sqrt{-\frac{27}{p^3}} \right) \right] - \frac{b}{3a} \quad (24)$$

Na tabela 2 são fornecidos os coeficientes numéricos da equação (22) para cada ponto da locomotiva, bem como as velocidades finais e tempos de trajeto.

Com os dados da Tabela 2, é possível calcular a redução do consumo de combustível (ΔC) em função do ponto da locomotiva e dos coeficientes de arrasto, e também os tempos disponíveis para as respectivas distâncias.

Tabela 2. Coeficientes numéricos da equação (22):

Ponto	Tempo	Veloc. final	Coeficientes numéricos			
			s	m/s	a	b
8	37.138	24,67	1	130,57	5.430	-228.424
7	43.089	22,13	1	124,35	5.169	-186.092
6	51.214	19,49	1	117,95	4.906	-147.772
5	64.431	16,42	1	110,63	4.610	-110.051
4	87.028	12,94	1	102,46	4.286	-74.814
3	110.770	10,67	1	97,17	4.082	-55.864
2	258.620	5,30	1	88,87	3.626	-21.735
1	684.710	2,19	1	77,93	3.381	-7.784

Tabela 3. Redução do consumo de combustível referenciado ao valor 9.650 litros e 12,18 h [792 l/h].

Ponto	Veloc. Final	Tempo Final	Var Tempo	Consumo combustível	Econ comb
	m/s	Horas	Horas	Litros	Litros
8	24,6	11,26	-0,92	8.920	-7.30
7	22,1	12,55	0,37	8.069	-1.581
6	19,4	14,25	2,07	7.554	-2.096
5	16,4	16,91	4,73	7.016	-2.635
4	12,9	21,45	9,27	6.391	-3.259
3	10,6	24,02	13,84	5.358	-4.293
2	5,30	52,44	40,26	5.302	-4.349
1	2,19	126,9	114,7	5.622	-4.029

5 ANÁLISE CFD

5.1 Sem defletores

- Forte desaceleração da massa de ar na frente da locomotiva.

- Desaceleração da massa de ar no topo da cabine da locomotiva.
- Forte desaceleração da massa de ar na frente do container superior do primeiro vagão.
- A diferença de altura entre a locomotiva e o primeiro vagão é: $\Delta h = 6,17 - 4,49 = 1,68 \text{ m}$. Área frontal do escoamento do ar: $A = \Delta h \cdot b = 1,68 \cdot 2,40 = 4,03 \text{ m}^2$.
- Aceleração da massa de ar acima do container superior do primeiro vagão.
- Forte gradiente de velocidade do ar no final do trem.
- Formação de vórtices nos espaçamentos entre a locomotiva e o vagão e entre os vagões.
- Formação de vórtices no final da locomotiva.
- Suave desaceleração da massa de ar próximo às superfícies laterais (15 m/s).
- Existência significativa de massa de ar estagnada entre os vagões.

5.2 Com defletores

- O defletor D_{L1} (Fig. 5) suavizou o escoamento de ar reduzindo a desaceleração, mas ainda permaneceu uma aceleração da massa de ar no topo da cabine, indicando assim que o defletor deverá ser mais alto.
- Os defletores D_{L2} (Fig. 5) não contribuíram para a melhora do escoamento de ar, não sendo necessários.
- Os defletores D_{L3} (Fig. 5) melhoraram o escoamento da massa de ar sobre a cobertura da locomotiva.
- Os defletores D_{L4} e D_{V1} (Fig. 6) ajudaram a melhorar o fluxo de ar, considerando o espaçamento entre a locomotiva e o primeiro vagão e a altura do vagão. A inclinação de D_{L4} deve manter o fluxo de ar na direção de D_{V1} , tornando-se assim mais efetivo.

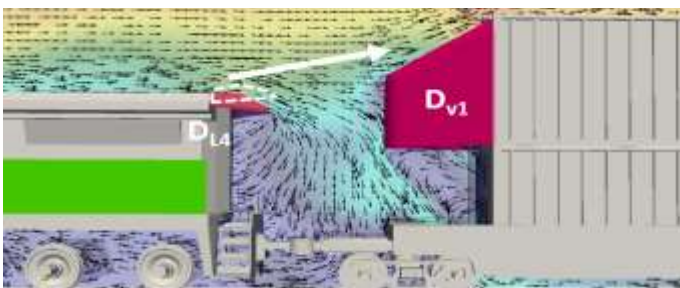


Figura 6. Defletores D_{L4} e D_{V1}

- O defletor D_{V3} , figuras 5-7, reduziu o gradiente de velocidade, mas indica que ele deveria ser mais longo e ter uma maior inclinação para baixo. A direção do fluxo de ar deveria ser para o chão, de forma mais suave.
- O defletor instalado no espaçamento entre os vagões (D_{V2}) melhorou o fluxo de ar sobre a parte superior do container, evitando assim as

interrupções causadas por esses espaçamentos

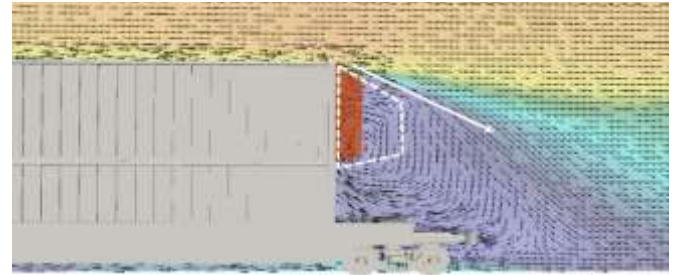


Figura 7. Defletor D_{V3} na cauda do último vagão do trem.

- Como os defletores estavam abertos na parte inferior, ocorreu a formação de vórtices dentro deles. Eles deveriam ser fechados na parte inferior e ter uma pequena inclinação.

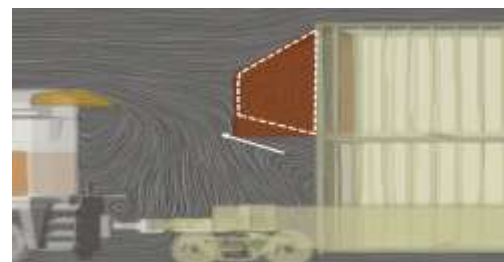


Figura 8. Vórtices formados dentro do defletor D_{V1} .

- Houve uma significativa redução do coeficiente de arrasto devido à utilização dos defletores:

Tabela 4. Valores dos coeficientes de arrasto obtidos

Posição	Coeficiente de arrasto		Variação %
	Original	Modificado	
Locomotiva	0,481	0,286	-40,55
Vagão 1	0,494	0,346	-30,03
Vagão 2	0,307	0,175	-42,94
Vagão 3	0,287	0,177	-38,11
Vagão 4	0,377	0,247	-34,33
Trem	1,368	1,043	-23,73

6 GANHOS DE DIESEL CALCULADOS

Os resultados obtidos com defletores e sem eles, para o modelo de trem (Fig. 9) formado por uma locomotiva AC44 e 29 vagões PRT tendo, cada um, 122,6 t, a uma velocidade de 22,8 m/s, foram:

- Sem defletores: 2.809 kW
- Com defletores: 2.449 kW
- Redução de potência calculada: - 360 kW



Figura 9. Modelo de trem com 29 PRT sem defletores.

Com defletores, o trem pode ir de 22,8 m/s para 24,6 m/s, e com isso o tempo de circulação reduziu de 12,18 h para 11,26 h, e, como resultado, a economia de combustível foi de 730 l em 1.000 km. Na (Fig. 9) temos a economia de combustível (C) em função da velocidade:

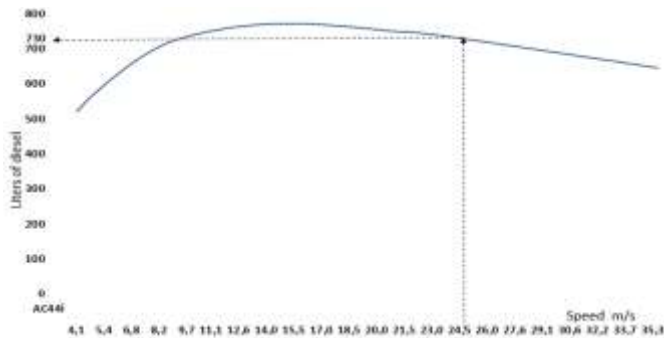


Figura 10. Consumo de combustível versus velocidade (m/s) mantendo a potência constante.

- Quando o ponto da locomotiva é reduzido de 8 para 7:

Com isso, obteve-se uma redução de 527 kW, na qual 360 kW foi devido à redução da resistência do ar e os outros 167 kW é devido à diminuição da velocidade do trem de 22,8 m/s para 22,1 m/s. O tempo de circulação aumenta de 12,18 h para 12,55 h. Mas, sendo o ponto da locomotiva agora 7, a vazão de combustível vai de 792,3 l/h para 642,8 l/h.

O tempo aumenta um pouco, mas o consumo horário de combustível reduz significativamente. Assim, a redução do consumo irá para 1.581 litros em 1.000 km, como mostra a Fig. 11.

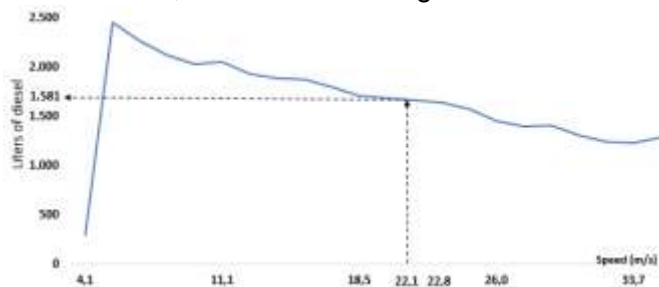


Figura 11. Consumo de combustível em função da velocidade e redução do ponto da locomotiva.

Essa é melhor configuração de operação para esse tipo de trem: menor velocidade e o uso de defletores nas locomotivas e vagões.

7 SIMULAÇÃO OPERACIONAL

No simulador operacional da Rumo foram usados coeficientes de arrasto novos e antigos e o trem nos pontos de aceleração 7 e 8, em um trajeto de 1.185 km (Rondonópolis a Tutóia) com 10.000 toneladas e duas locomotivas AC44i.

O simulador calculou o consumo médio de combustível, a cada 10 metros, com os respectivos coeficientes de arrasto em cada ponto de aceleração. Na tabela 5 temos a comparação entre os tempos de trajeto e o consumo de combustível obtidos.

Tabela 5. Resultado da simulação da operação

Parâmetros	Ponto da locomotiva	Tempo de circulação	Consumo de combustível
	Máximo	hh:mm:ss	litros
Sem defletores	Ponto 8	30:25:00	21.862
	Ponto 7	33:45:00	21.790
Com defletores	Ponto 8	28:40:00	21.226
	Ponto 7	31:18:00	21.034

Uma redução pode ser observada comparando o resultado do ponto 8, sem defletores com os pontos 7 e 8, com defletores:

- Ponto 7 da locomotiva - 828 litros;
- Ponto 8 da locomotiva - 636 litros.

Sendo assim, a melhor opção é inserir defletores e reduzir para o ponto 7 resultando em um ganho de 828 litros.

Considerando somente a seção do trecho calculado, o ganho estimado para 2022 será de 397.440 litros de diesel por ano, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6. Ganho calculado.

Ano	2019	2020	2021	2022
Vagões	72	216	432	720
Trens/tab	1	3	6	10
Trens/mês	4	12	24	40
Trens/ano	48	144	288	480
Litros/mês	3.312	9.936	19.872	33.120
Litros/ano	39.744	119.232	238.464	397.440

8 TIPOS DE CONTAINERS

Quanto maior for o espaço entre os vagões, maior será o coeficiente de arrasto.

Como não será possível inserir defletores entre os vagões e, conseqüentemente, não se poderá obter melhoramento do coeficiente de arrasto em (n_v - 2) vagões do trem, este espaçamento terá que ser reduzido de outra maneira.

Considerando um trem com vagões *double stack* com 2 truques e um com vagões com truques articulados, ambos com acomodação inferior para container de 40' (Fig. 12), os espaçamentos entre os containers superiores são dados na Tabela 7:

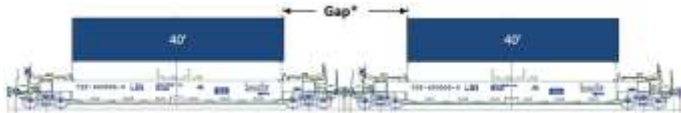


Figura 12. Espaçamento entre os containers superiores.

Tabela 7. Gap entre containers.

Configuração	Gap	Configuração	Gap
Vagões	m	Vagões	m
Single 40'- 40'	7,328*	Artic 40'- 40'	3,386
Single 48'- 48'	4,890	Artic 48'- 48'	0,948
Single 53'- 53'	3,366	Artic 53'- 53'	NOK

O uso de vagões *double stack* articulados tem como desvantagem o alto peso por eixo dos truques intermediários que podem chegar a 42 t, fazendo com que os trilhos não o suportem. Assim, para se obter o menor espaçamento entre os containers, deve-se usar o tipo 53' entre dois vagões (2 truques): 3,366 m.

9 SUGESTÕES PARA AS PRÓXIMAS ETAPAS

- Fazer modelos em escala para testes em túnel de vento e assim analisar se os coeficientes de arrasto obtidos são os mesmos fornecidos através do CFD.
- Usar o CFD para comparar trens com diferentes espaçamentos entre os containers superiores, de dois vagões consecutivos.
- Com o auxílio do CFD, melhorar o projeto dos defletores a serem usados.
- Fabricar os defletores para usar em teste de campo e medir os resultados de economia de combustível.

10 CONCLUSÕES

10.1 Defletores

O defletor (D_{L4}) da locomotiva deve ter um ângulo variável devido aos diferentes comprimentos dos containers.

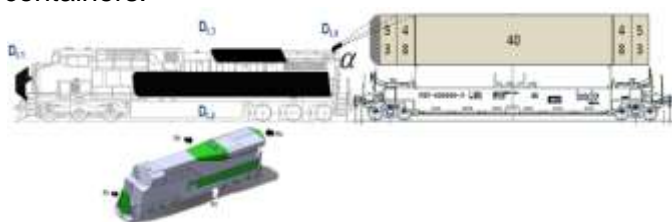


Figura 13. Detalhe do defletor D_{L4} da locomotiva.

Na tabela 8 são mostrados os valores dos ângulos para diferentes comprimentos e para vagões com a mesma altura da locomotiva (normal):

Tabela 8. Ângulo do defletor x tipo de container.

Container	α
pés	graus
53	30°
48	25°
40	19°
normal	$\alpha \approx 0^\circ$

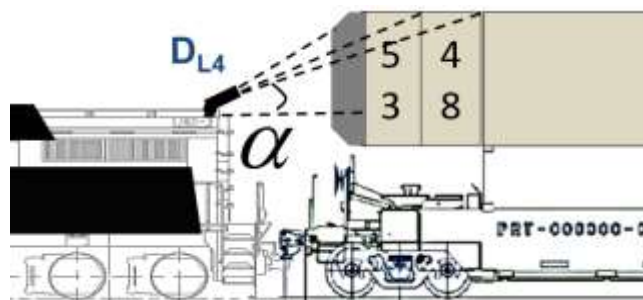


Figura 14. Ângulo do defletor da locomotiva D_{L4} .

10.2 Economia de combustível

A simulação do trem para o trajeto Rondonópolis – Tutóia (Fig. 15), usando dados fornecidos pelo CFD para os coeficientes de arrasto, mostrou que houve uma importante economia de combustível, mesmo quando o trem está operando a 17 m/s (60 km/h).

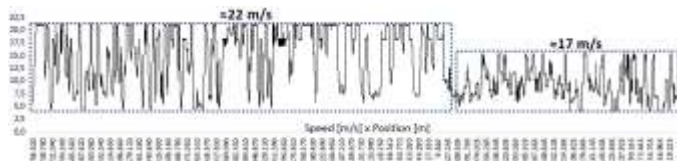


Figura 15. Velocidade x posição de Rondonópolis a Tutóia.

10.3 Considerações finais

É fundamental a utilização de conceitos aerodinâmicos para o projetar veículos ferroviários, pois, como mostrado, pode-se obter uma boa economia de combustível e eficiência energética.

11 REFERÊNCIAS

- Barkan, C. P.L. 2010. *Rail Transportation Energy Efficiency*. Rail Transportation Energy Efficiency.
- Kukreja, N. & Kumar S. 2016. *Aerodynamic loss in inter-car space of train and its reduction*.
- Tauflow Engenharia, CFD Simulations 2018, *Simulação numérica para coeficiente de arrasto para composição ferroviária*.
- Hungria L. H., 2017. *Segurança Operacional em Trens de Carga*.
- Kennedy, W. A. 2010, *Mounting of Drag Reducing Devices for Staked Intermodal Rail Cars & Drag Reducing Devices for Stacked Intermodal Rail Cars*. Union Pacific.