



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

# SOBRE UMA FÓRMULA PARA O CÁLCULO DO COMPRIMENTO VIRTUAL DAS ESTRADAS DE RODAGEM

RICARDO BRASÍLICO PAES DE BARROS SCHROEDER

SÃO CARLOS  
2021

**RICARDO B.P.B. SCHROEDER**

**"SÔBRE UMA FÔRMULA PARA  
O CÁLCULO DO COMPRIMENTO VIRTUAL  
DAS ESTRADAS DE RODAGEM"**

**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS U. S. P.  
PUBLICAÇÃO Nº 96  
SÃO CARLOS  
1964**

I

I N T R O D U Ç Ã O

Com o presente trabalho estamos oferecendo uma contribuição à solução do problema da escolha do traçado preferível, para uma rodovia, quando diversos traçados em estudo são propostos.

Ao Engenheiro Rodoviário, que se ocupa do estudo e projeto de uma rodovia, muitas vezes é difícil decidir qual o melhor traçado, apenas baseando-se nas características gráficas e aparentes, como normalmente é feito.

Entretanto, para chegar a um resultado certo, torna-se necessário o estabelecimento de uma grandeza comum de comparação, capaz de fato, de indicar por via numérica a vantagem de um traçado sobre os demais.

Em se tratando de Estradas de Ferro têm-se empregado o método do comprimento virtual e ou o da despesa anual.

Por que não utilizar o primeiro método nas Estradas de Rodagem? É o que vamos fazer.

Vamos com esta publicação estabelecer uma fórmula e método para o cálculo do comprimento virtual dos traçados ou variantes de uma estrada de rodagem, que seja racional, e permita comparar os diversos traçados em estudo, de forma que o Engenheiro Rodoviário possa se decidir pelo melhor.

No ensejo desta introdução apresentamos os nossos agradecimentos a todos que colaboraram na feitura do mesmo.

O autor.



## GENERALIDADES

Comprimento virtual de um traçado, ou variante de uma ferrovia, não é uma noção recente. É quase tão antiga quanto o a parecimento da estrada de ferro. De acôrdo com C. Stevenson, datam de 1838 os primeiros trabalhos, ou publicações onde se empregou a expressão "comprimento virtual". Segundo uns foi o Engenheiro alemão Lindner, e segundo outros o Engenheiro norte-americano Ghega, quem primeiro chamou de "desenvolvimento virtual" ou "comprimento virtual" à extensão fictícia, em via horizontal e retilínea, equivalente a uma linha dada.

Entretanto, os mais antigos dados positivos que chegaram até os nossos dias são aquêles obtidos experimentalmente pelos Engenheiros das Estradas de Ferro Irlandêsas, resultados êses publicados no "Civil Engineer and Architects Journal" daquela época. Determinavam as distâncias horizontais equivalentes pela resistência a grêdes diversos. A título ilustrativo damos na tabela 1, o resultado das experiências.

TABELA - 1

GRÊDE %	COMPRIMENTO VIRTUAL	
	RAMPA	DECLIVE
0,1	1.13	1.00
0,2	1.27	1.00
0,3	1.38	1.00
0.4	1.53	1.00
0.5	1.67	1.00
0.6	1.80	0.83
0.7	1.96	0.83
0.8	2.10	0.83
0.9	2.23	0.83
1.0	2.40	0.83

Se verificarmos o cálculo utilizando a fórmula de Stevenson com dados atuais, êsses resultados estão bem aquêms dos atuais, tabela 2.

TABELA - 2

GRÊDE %	COMPRIMENTO VIRTUAL	
	RÂMPA	DECLIVE
0	1,00	1,00
1	1.33	1.00
2	1.67	1.00
3	2.00	1.00
4	2.25	1.00
5	2.67	1.00
6	3.00	0.90
7	3.33	0.90
8	3.67	0.90
9	4.00	0.90
10	4.33	0.90

Durante todo o período de desenvolvimento das estradas de ferro, e durante mais de um século, em que a ferrovia monopolizou os transportes terrestres, muitas fórmulas e métodos foram propostos para calcular o comprimento virtual das Estradas de Ferro: Método das Estradas de Ferro Italianas, Método de Kreuter, Fórmula de Baum, Fórmula do Engenheiro nosso Patrício C. Stevenson, etc. Porém tôdas essas fórmulas se aplicavam sômente às Estradas de Ferro. Nenhuma às Estradas de Rodagem. Não vamos passar aqui em revista o estudo daqueles métodos e fórmulas, pois não é essa a finalidade do trabalho. Eventualmente as citaremos uma vez ou outra com intenção comparativa. Não se pode assinalar todavia que não hajam referências a tentativas para estabelecimento de

fórmula para cálculo do comprimento virtual nas estradas de rodagem. Bruno Bolis, na revista "Le Strade" apresentou um estudo nesse sentido. Também um Engenheiro Brasileiro, na Revista do DER de São Paulo, desenvolveu um método para determinação do comprimento virtual das estradas de rodagem. Outros estudiosos no assunto têm procurado desenvolver fórmulas, baseados em consumo de combustível. Acharnos os métodos baseados em consumo de combustível um pouco restritos demais pois que o consumo de combustível dos automóveis varia muito com o tipo do motor, combustível, potência e rendimento do motor. Temos como positivo que o método ou critério mais seguro e justo para determinação do comprimento virtual de uma via, e de uma estrada de rodagem em particular ainda é o critério baseado no trabalho da resistência oposta ao movimento, pelo veículo.

O presente trabalho tem em vista pois estabelecer uma fórmula para o cálculo do comprimento virtual de uma estrada de rodagem existente ou em estudo, da qual se conhecem os elementos definidores.

Na exposição do texto a seguir vamos justificar a razão do método e dados escolhidos.

## CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Antes de entrar no estudo detalhado do método para a determinação da fórmula para cálculo do comprimento virtual de rodovias em geral vamos dar alguns conceitos e definições necessárias à compreensão do texto, inclusive precisar bem o conceito de comprimento virtual.

### Comprimento real:

Denominaremos comprimento real de uma estrada ao comprimento da projeção horizontal do eixo da estrada.

### Comprimento virtual\*

Denomina-se comprimento virtual de uma estrada dada, ao comprimento em reta e nível equivalente ao da estrada considerada sob um critério determinado.

### Coefficiente virtual

Define-se como coeficiente virtual ou coeficiente de redução ao horizonte, de uma estrada, ao quociente da divisão do comprimento virtual pelo comprimento real, da estrada.

Fixando-se diversos critérios de equivalência se terá outros tantos critérios de definição de comprimento virtual.

Os critérios mais comumente usados no caso de ferrovias foram os seguintes:

- a) critério de trabalho mecânico;
- b) critério de despesa de exploração;
- c) critério do tempo de percurso (ou velocidade);
- d) critério do consumo de combustível, etc.

---

\* - Alguns denominam: "desenvolvimento virtual".

Chamemos de  $L_r$  ao comprimento real,  $L_v$  ao comprimento virtual e  $\Delta v$  ao coeficiente virtual de uma estrada. Tendo em vista a definição de coeficiente virtual podemos escrever:

$$L_v = \Delta v \cdot L_r \quad (1)$$

Qualquer que seja o critério de equivalência escolhido entre os citados nos itens a, b, c, d, podemos estabelecer o seguinte princípio:

"O traçado\*\* que tiver o menor comprimento virtual, entre diversos traçados, ou variantes para uma estrada estudada, é o preferível".

#### Traçado:

É o conjunto de características técnicas, em planta e em perfil, que definem o eixo da estrada.

De acôrdo com a definição de comprimento virtual, o comprimento virtual de uma estrada tôda em reta e nível é o próprio comprimento real da estrada, e o seu coeficiente virtual é igual a 1 (um).

Na realidade, todos aquêles critérios (a, b, c, d) também são equivalentes entre si, e se se pudessem estabelecer as relações recíprocas, os comprimentos virtuais calculados com todos aquêles critérios, para uma mesma estrada deveriam ser iguais.

---

\* Deve ficar bem claro que o comprimento virtual se aplica tanto ao traçado de uma estrada em estudo, quanto ao traçado de uma estrada existente. Quando estamos calculando os comprimentos virtuais de diversos traçados ou variantes de uma estrada a ligar dois pontos, nada nos impede que calculemos o comprimento virtual da estrada já existente entre os dois pontos. O estudo é comparativo.



## COMPRIMENTO VIRTUAL DAS ESTRADAS DE RODAGEM

Tendo como certo o exposto anteriormente, o critério de equivalência mais racional a ser aplicado na determinação da fórmula para cálculo do comprimento virtual dos traçados rodoviários será o do trabalho mecânico, e em particular o da resistência ao movimento do veículo rodoviário sobre o pavimento rodoviário.

À primeira vista parece difícil a aplicação deste critério; os tipos de veículos e de pavimentos rodoviários são muitos. As resistências variam com os veículos e com a velocidade. Mas aqui como no caso das ferrovias podemos fazer algumas simplificações, sem prejuízo da generalidade da aplicação da fórmula, como seria, se o critério fôsse o do consumo de combustível.

As hipóteses que vamos fazer para estabelecer nossa fórmula são:

- 1) Veículo rodoviário: veículo de carga (caminhão).
- 2) Tipo de pavimento: pavimento asfáltico ou pavimento de concreto de cimento portland.
- 3) Velocidade: 60 km/h, ou seja, dentro dos limites legais.
- 4) Estradas construídas: de acordo com as condições técnicas das Normas Técnicas Oficiais para Rodovias Brasileiras - (Portaria nº 19, de 10.1.49, do M.V.O.P.

As hipóteses por nós formuladas são as mais coerentes e racionais, pois o grosso do volume de tráfego das nossas rodovias é o dos veículos de carga. Cerca de 60 % a 75%, de acordo com as últimas estatísticas do DER-SP.

A consideração de estradas pavimentadas e feitas de acordo com as Normas Brasileiras, também está dentro da realidade, pois são essas as características das estradas estudadas pelo DNER e pelos DERs.

Estabelecidas as hipóteses, que pelo justificado, são perfeitamente reais, passaremos à finalidade principal do trabalho: estabelecimento de fórmula para o cálculo do comprimento virtual de traçados rodoviários.

Os veículos rodoviários locomovem-se sobre o pavimento por simples aderência, por efeito da força ativa motora proveniente do momento torcedor do motor.

As forças do binário desse momento aplicadas no aro da roda e no eixo do veículo denominamos esforço trator, fig.1. Essas forças suscitam duas forças passivas; soma das resistências o postas ao movimento e aderência, aplicadas respectivamente no centro da roda e no ponto de contato do aro da roda com o pavimento, tangencialmente a este - fig. 2.

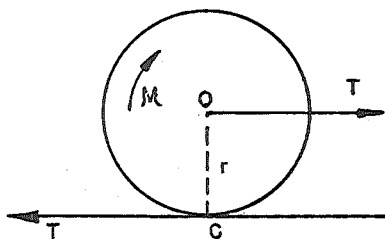


Fig. 1

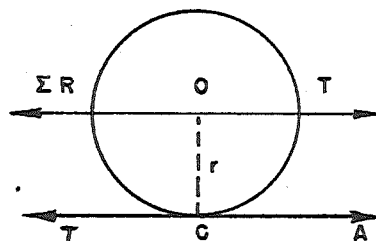


Fig. 2

Sabemos da mecânica de locomoção dos autoveículos que para haver movimento devemos ter duas condições simultâneas estabelecidas entre aquelas forças:

$$1^a) \quad |T| > |\Sigma R|$$

$$2^a) \quad |T| \leq |A|$$

onde

T: é o esforço trator.



(2)

(3)

$\Sigma R$ : a soma das resistências opostas ao movimento.

A: a aderência.

O valor de  $\Sigma R$  nas diversas condições do traçado da rodovia, vai-nos dar os meios para estabelecer a fórmula do comprimento virtual.

O trabalho mecânico efetuado pela resistência oposta ao movimento será:

a) na estrada ou traçado real: (espaço vezes força).

$$T = L_r \cdot \Sigma R \quad (4)$$

b) na estrada ou traçado virtual:

$$T_v = L_v \cdot R_n \quad (5)$$

Onde  $R_n$  é a resistência oposta ao movimento em reta e nível, e as demais letras como definidas atrás.

Pelo critério da equivalência do trabalho mecânico da resistência, devemos ter que o trabalho realizado na estrada virtual deve ser igual ao trabalho realizado na estrada real, ou

$$T_v = T_r$$

ou

$$L_v \cdot R_n = L_r \cdot \Sigma R.$$

donde

$$L_v = L_r : \frac{\Sigma R}{R_n} \quad (6)$$

A expressão (6) é a fórmula sintetizada do comprimen

to virtual.

Vamos desenvolvê-la para o caso das rodovias.

As resistências que somadas dão  $\Sigma R$ , inclusive a própria resistência em reta e nível são as seguintes:

1) Resistências Normais

- a) Resistência de atrito entre aro e pavimento.
- b) Resistência do ar.
- c) Resistência de inércia das peças girantes.
- d) Resistência de atrito das transmissões.

2) Resistências Acidentais:

- a) Resistência de rampa.
- b) Resistência de curva.
- c) Resistência devido às irregularidades planimétricas e altimétricas do pavimento.
- d) Resistência dos túneis.
- e) Resistência devido à força centrífuga nas curvas horizontais e nas curvas verticais.
- f) Resistência devido às ações giroscópicas.
- g) Resistência devido ao vento.

No nosso curso "Mecânica da Locomoção dos Autoveículos" verificamos que dentro da precisão desejada, apenas algumas daquelas resistências enunciadas atrás, exercem realmente oposição ponderável ao deslocamento do veículo:

- 1) Resistência de rolamento:  $R_r$
- 2) Resistência do ar:  $R_{ar}$
- 3) Resistência de rampa:  $R_i$

Tôdas as demais somadas, não chegam a atingir juntas 10% do valor da resistência de rolamento. E como algumas dessas são acidentais, isto é, ocorrem só ocasionalmente, podemos per-

feitamente negligenciá-las no cálculo.

Portanto, a soma das resistências  $\Sigma R$  da expressão (6) será:

$$\Sigma R = R_r + R_{ar} + R_i \quad (7)$$

Vamos substituí-la na expressão (6) porém lembremos que  $R_r$  e  $R_{ar}$  são resistências normais, existem sempre desde que iniciado e continuado o movimento. A soma destas duas resistências chama-se correntemente resistência em reta e nível:

$$R_n, \text{ ou} \quad (8)$$

$$R_n = R_r + R_{ar}$$

$R_n$  ocorre em tôda a extensão  $L_r$  da estrada. A resistência de rampa  $R_i$  é uma resistência acidental e só ocorre nos trechos em rampa; portanto, podemos escrever a expressão (6) da seguinte maneira:

$$L_v = L_r \cdot \frac{R_n}{R_n} + \Sigma \frac{L_i R_i}{R_n} \quad \text{ou}$$

$$L_v = L_r + \Sigma \frac{L_i R_i}{R_n} \quad (6')$$

Na expressão (6')

$L_v$ : é o comprimento virtual da estrada.

$L_r$ : é o comprimento real da estrada

$\Sigma \frac{L_i R_i}{R_n}$ : soma dos comprimentos reais  $L_i$  dos trechos em rampa, com resistências de rampa,  $R_i$

Valor de  $R_n$  a adotar:

Vimos que

$$R_n = R_r + R_{ar}$$

mas

$$R_r = P \cdot r_r \quad (9)$$

onde P é o peso bruto do veículo e  $r_r$  a resistência de rolamento específica ou unitária; e

$$R_{ar} = K \cdot SV^2 \quad (10)$$

onde

K é uma constante que depende do peso específico do ar:

$$K = \frac{\gamma}{2g}$$

$\gamma$  = peso específico do ar :  $\text{kg/m}^3$

$g$  =  $9,81 \text{ m/seg}^2$

$S$  = área da seção mestra do veículo: em  $\text{m}^2$

$V$  = é a velocidade do veículo: em  $\text{m/seg}$ .

Cálculo ou valor de  $r_r$ , K, S, e V

Valor de  $r_r$ :

A resistência específica de rolamento  $r_r$  entre aro pneumático e pavimento, segundo as mais recentes experiências da Dunlop Inglesa, tem para caminhões e ônibus rolando à velocidade 32 km/h em condições recomendadas, o valor de 8,9 kg/t, para pneus de alta pressão.

Um valor de  $r_r$  ( $8,9 \pm 0,9$ )  $\frac{\text{kg}}{\text{t}}$  cobre a gama de variadas dimensões de pneus usados em caminhões e ônibus. Outras experiências da Dunlop determinaram a variação da resistência específica de rolamento com a velocidade, tomando a resistência a

32 km/h como 100%. Os resultados figuram na tabela nº 3. Até 60 km/h a resistência específica é praticamente constante. É o que vamos adotar.

TABELA 3

Velocidade	Resist. Rol. Especif.	
	%	kg/t
0	100	8,9
10	100	8,9
20	100	8,9
30	100	8,9
40	100	8,9
50	100	8,9
60	100	8,9
70	102	9,1
80	106	9,4
90	112	10,0
100	120	10,7

Cálculo de K: para as condições de pressão  $p_a$ , e temperatura  $t_a$  do ar:

$$p_a = 760 \text{ mm de}$$

$$t_a = 150^\circ\text{C}$$

temos

$$\gamma = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

Portanto:

$$K = \frac{1,225}{2 \times 9,81} = 0,0625$$

Entretanto as experiências mostram que aplicando K

com esse valor constante na fórmula de  $R_{ar}$ , e comparando essas resistências calculadas pela fórmula com as resistências obtidas experimentalmente, para várias seções onde se varie a forma e o comprimento da seção mestra, os valores não são iguais.

É necessário introduzir um coeficiente de forma  $C_x$  então a fórmula (10) passará a:

$$R_{ar} = C_x \cdot K \cdot SV^2 \quad (10')$$

$C_x$  varia de 0,23 a 0,91 para automóveis, desde os veículos com carroceria aerodinâmica àqueles com carroceria clássica.

Outros valores de  $C_x$  são

$C_x = 0,43$  para a perua Volkswagen (kombi)

$C_x = 0,50 - 0,60$  para Ônibus do tipo Mercedes-Benz  
O-321 - H e O-321-H1

$C_x = 0,85$  a  $0,90$  ou  $1,00$  para caminhões do tipo clássico (carroceria e cabine não aerodinamicamente carenadas).

Vamos agora considerar dois caminhões que chamaremos de Caminhões-Padrões para determinação do comprimento virtual de uma rodovia. Esses caminhões pelas suas características se aproximam bastante dos caminhões médios e pesados fabricados no Brasil.

#### Características do Caminhão - Padrão, Médio

Pêso bruto: eixo dianteiro 2 rodas: (8,25 x 20)	3.300 kg
Eixo traseiro 4 rodas: (9,00 x 20):	6.700 kg
Total .....	10.000 kg

Área da seção mestra -  $5 \text{ m}^2$



Características do Caminhão-Padrão, Pesado

Pêso bruto: eixo dianteiro 2 rodas: 5.000 kg  
(11,00 x 20)

Eixo traseiro 4 rodas: (11,00 x 20) 10.000 kg

Total ..... 15.000 kg

Área da seção mestre : 5 m<sup>2</sup>

Cálculo de  $r_n$  para os dois caminhões

Se na equação (8) substituirmos  $R_r$  e  $R_{ar}$  pelas expressões das equações (9) e (10'), e dividirmos tudo pelo pêso bruto, teremos a resistência específica em reta e nível:

$$r_n = \frac{R_n}{P} \quad \text{ou}$$

$$r_n = \frac{R_r}{P} + \frac{R_{ar}}{P}$$

ou ainda

$$r_n = r_r + \frac{C_x KSV^2}{P} \quad (11)$$

podemos então calcular  $r_n$  para os dois caminhões. Adotamos  $C_x = 0,9$ . A velocidade normalmente permitida para caminhões em rodovias pavimentadas, de acordo com as prescrições legais é atualmente de 60 km/h.\* Vamos adotar esta velocidade:

1) Caminhão de 10 t

---

\* - Nos trechos de rampa batida com 5% ou mais de 5% de inclinação a velocidade é de 40 km/h.

$$r_{ar_{10}} = \frac{0,9 \times 0.0625 \times 5 \times \left(\frac{60}{3,6}\right)^2}{10} = \frac{78}{10} = 7,8 \text{ kg/t}$$

2) Caminhão de 15 t

$$r_{ar_{15}} = \frac{78}{15} = 5,2 \text{ kg/t}$$

Portanto:

No 1º caso:

$$r_{n_{10}} = 8,9 + 7,8 = 16,7 \frac{\text{kg}}{\text{t}}$$

e no 2º caso

$$r_{n_{15}} = 8,9 + 5,2 = 14,1 \text{ kg/t}$$

O valor médio de  $r_n$  será 15,4 kg/t.

Vamos adotar na nossa fórmula o valor de 15 kg/t para resistência em reta e nível, que difere daqueles dois casos de menos de 10%, lembrando que essa porcentagem é a precisão obtida nas experiências da Dunlop. Mesmo assim esse valor de 15 kg/t para  $r_n$  não distancia muito dos valores calculados para caminhões e ônibus dos tipos fabricados no Brasil, rodando à velocidade de 60 km/h. Tabela. 4.

Sem alterar o valor da expressão da fórmula (6') podemos substituir a resistência absoluta, pela resistência unitária. Então teremos a expressão, substituindo

$R_i$  por  $r_i$  e

$R_n$  por  $r_n$  :

$$L_v = L_r + \sum \frac{L_i \cdot r_i}{r_n} \quad (6'')$$

TABELA 4

Veículo	Pêso bruto lotado: t	$r_n$ a 60 km/h kg/t
Caminhão Chevrolet 6500	8.845	16,3 (1)
Caminhão FNM-D-9500	14,0	24,5 (4)
Idem D-11.000	15,0	24,0 (4)
Ônibus FNM D-11.000	10,0	29,4 (4)
Caminhão Ford F 600	8,85	16,0 (1)
Idem Diesel	9,0	15,9 (1)
Caminhão Internacional N184	11,58	17,0 (1)
Caminhão Mercedes Benz LP 321	10,0	17,0 (1)
Idem LP 331	15,0	15,6 (1)
Ônibus Mercedes Benz - O-321-H	9,3	15,2 (2)
Idem O-321-HL	10,7	14,3 (2)
Caminhão Scania Vabis L 75	15,0	15,4 (1)
Ônibus Scania Vabis B 75	14,5	12,6 (2)

1 - Calculado  $c/c_x = 0,9$ .

2 - Calculado  $c/c_x = 1,0$ .

3 - Calculado  $c/c_x = 0,5$ .

4 - Equipado com pneus de baixa pressão.

$r_i$  é a resistência unitária da rampa de valor  $i$ , no trecho correspondente à extensão  $L_i$ . A relação para calcular  $r_i$  é

$$r_i = 10 i (12) \quad \text{com } i \text{ em } \% \text{ e } r_i \text{ em kg/t}$$

Podemos escrever (6'') da seguinte forma:

$$L_v = L_r + L_1 \frac{r_1}{r_n} + L_2 \frac{r_2}{r_n} + \dots + L_i \frac{r_i}{r_n}$$

ou

$$L_v = L_r + \frac{1}{r_n} (L_1 r_1 + L_2 r_2 + \dots + L_i r_i) \quad (6''')$$

O comprimento virtual de um traçado ou de uma estrada de rodagem é a soma do comprimento real com  $\frac{1}{r}$  enésima parte dos produtos das extensões das rampas pelas resistências unitárias dessas rampas.

De acordo com as Normas Brasileiras as rampas variam segundo a classe da estrada e a região topográfica de 1% a 7% de inclinação.

Conforme o sentido considerado a rampa pode ser positiva ou negativa. No nosso caso vai então variar de + 7% a - 7%. Este último caso, de rampa negativa, ou contra-rampa (declive) embora haja ação da gravidade atuando favoravelmente ao esforço tração do veículo, no cálculo do comprimento virtual não podemos simplesmente aplicar a fórmula, pois senão teríamos em certos comprimentos virtuais negativos o que praticamente é inexecutável. Neste caso temos que fazer como o fizeram os Engenheiros das Estradas de Ferro Irlandesas e o Engenheiro nosso patrício C. Stevenson. Vamos recorrer a algum valor comparativo relacionado com o veículo.

Segundo experiências realizadas, com caminhões de todos os tipos, pelo "Report of Committee on Economics of Motor Vehicle Size and Weight" nos Estados Unidos, a variação do consumo de com

bustível em diversas grêdes de rodovia é a indicada na tabela 5.

De acordo com essa tabela vemos que o consumo varia, crescendo com a rampa em relação ao grêde zero por cento (nível). Entretanto vemos também que ela não se anula com o crescer do valor absoluto da inclinação das contra-rampas; decresce até a uma contra-rampa da ordem de -5% e depois permanece praticamente constante.

TABELA 5

CONSUMO DE GASOLINA DE VEICULOS DE CARGA *	
Rampa %	Consumo l/km
+ 8	2.800
+ 7	2.400
+ 6	2.000
+ 5	1.630
+ 4	1.340
+ 3	1.080
+ 2	0.850
+ 1	0.610
0	0.376
- 1	0.264
- 2	0.206
- 3	0.188
- 4	0.176
- 5	0.165
- 6	0.165
- 7	0.165
- 8	0.165

\* Valor médio para os 7 veículos e estradas especificados no texto

De acôrdo com a equação do consumo de combustível, em função do esforço trator absorvido, sabemos que

$$C = \frac{c \cdot Ne}{V \cdot \gamma} \cdot \frac{T_e}{T_i} \quad (13)$$

onde

C é o consumo de combustível em km/l

c é o consumo específico em  $\frac{g}{C \cdot V \cdot h}$

Ne é a potência efetiva em C.V.

V a velocidade em km/h, do veículo

$\gamma$  é o pêsso específico do combustível

$T_e$  é o esforço trator disponível com Ne,

$T_i$  é o esforço trator absorvido realmente, isto é, o consumo de com bustível em litros por quilômetro, inverso da expressão (13) é proporcional ao esforço trator  $T_i$  absorvido que por sua vez é proporcional à resistência. Portanto podemos dizer que o trabalho mecânico realizado em vencer a rampa é proporcional ao consumo. Logo estabelecendo relações entre o consumo em nível e o consumo em diversos grêdes, podemos admitir que essas relações são as mesmas guardadas entre as resistências das rampas. Vamos então calcular essas relações com os dados da tabela 5.

Admitindo pois o consumo proporcional ao esforço trator absorvido e portanto à resistência temos, que a rampa corresponde ao consumo seria :

$$i = \frac{\left(\frac{C_i}{C_0} \times r_n\right) - r_n}{10} \quad (14)$$

onde

$C_i$  é o consumo na rampa i

$C_0$  é o consumo na rampa 0 (nível)

Aplicando à fórmula 14 os dados da tabela 5 temos para  $r_n = 15 \text{ kg/t}$  os resultados da tabela 6.

TABELA 6

Rampa %	Rampa % corresp	Comprimento virtual de 1 km = $\Delta_v$	Idem pela fórmula simples
+ 8	+ 9,7	+ 7,45	+ 6,33
+ 7	+ 8,1	+ 6,4	+ 5,67
+ 6	+ 6,5	+ 5,3	+ 5,00
+ 5	+ 5,0	+ 4,33	+ 4,33
+ 4	+ 3,9	+ 3,6	+ 3,67
+ 3	+ 2,8	+ 2,87	+ 3,00
+ 2	+ 1,9	+ 2,27	+ 2,33
+ 1	+ 0,9	+ 1,60	+ 1,67
0	0	+ 1,00	+ 1,00
- 1	- 0,45	+ 0,70	+ 0,33
- 2	<del>- 0,73</del>	<del>+ 0,51</del>	+ 0,33
- 3	- 0,75	+ 0,50	- 1,00
- 4	- 0,80	+ 0,47	- 1,67
- 5	- 0,86	+ 0,43	- 2,33
- 6	- 0,86	+ 0,43	- 3,00
- 7	- 0,86	+ 0,43	- 3,67
- 8	- 0,86	+ 0,43	- 4,33

As duas últimas colunas (39 e 49) da tabela 6, são os comprimentos virtuais de um quilômetro em rampa, calculados com as 1ª e 2ª colunas, da mesma tabela, respectivamente. Como o comprimento é 1 km, esse valor também é o coeficiente virtual da rampa de 1 km.

Pelo exame das colunas 1ª e 2ª da tabela 6 verifica-se que para rampas entre 0 e + 5% o consumo é proporcional à rampa. De + 5% para cima cresce rapidamente, talvez porque a relação para cálculo da resistência de rampa  $r_i = 10i$  não é exato para ângulos grandes. Porém as rampas acima de 5% são pouco co-

muns em estradas de rodagem projetadas, contemporâneas. Dêsse modo podemos adotar a seguinte fórmula já com os coeficientes, para calcular  $L_v$  (Fórmula 6'' desenvolvida).

$$L_v = L_r + \frac{1}{15} (L_1 r_1 + L_2 r_2 + L_3 r_3 + \dots + L_i r_i) - (K_1 L_1 + K_2 L_2 + K_3 L_3 + \dots + K_j L_j) \quad (IV)$$

$L_v, L_r, L_i, L_j$ , em km

$r_1, r_2, \dots$  em kg/t

$K_1, K_2, K_3$ , valores na tabela 7.

TABELA - 7

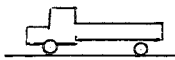
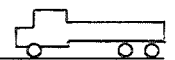
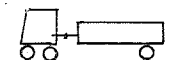
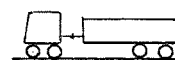
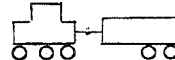
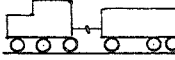
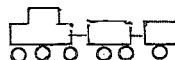
Contra rampa %	$K_j$
- 1	0,30
- 2	<del>0,49</del> 0,45
- 3	0,50
- 4	0,53
- 5 ou mais	<del>0,57</del> 0,56

Os veículos a que se refere a tabela nº 4 são os caminhões, cujas características vão assinaladas na tabela 8.



TABELA 8

(Pneus: todos 11.00 x 20)

Nº de ordem	Veículo tipo	Potência bruta H.P.	Pêso bruto em t
1		136	9 a 12
2		165	16,5 a 24,5
3		128	15 a 23
4		184	23 a 34,5
5		200	29 a 45
6		245	37 a 55
7		295	43,5 a 64,5

## C O N C L U S Õ E S

Pelos dados apresentados para cálculo dos coeficientes a entrarem na fórmula (6''') pode-se verificar que o objetivo de permanecer no critério do trabalho mecânico, foi praticamente alcançado. Por outro lado, tendo em conta que o trabalho total do veículo não se anulava mesmo em determinadas condições de traçado (rampa em declive), introduzimos na fórmula coeficientes que levam em conta êsse efeito. Com isso pensamos ter uma fórmula bem de acordo com a realidade.

OBSERVAÇÃO : Entre diversos traçados para vencer uma determinada diferença de nível, terá comprimento virtual menor o que puder vencer em rampa batida maior possível (não incluindo resistência de curva:rodovias). Por exemplo: Altura a vencer: 700 m;

rampa batida: 5%      traçado mínimo 14 km

rampa batida: 2%      traçado mínimo 35 km

$$1^{\circ} \text{ caso: } L_v = 14 + \frac{1}{15} (14 \times 50) = 60.7 \text{ km}$$

$$2^{\circ} \text{ caso : } L_v = 35 + \frac{1}{15} (35 \times 20) = 81,8 \text{ km}$$

isso porque como se vê na fórmula de Stevenson, a parcela referente à rampa sendo  $\frac{H}{r_n}$ , onde H é altura a vencer, e  $r_n$  a resistência em reta e nível são constantes, então essa parcela permanece constante, somando somente a relativa a  $L_R$ , que aumenta com o diminuir de  $i$ .

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

1. Cálculo do comprimento virtual e coeficiente virtual do trecho da Via Anchieta, na Serra do Mar, entre Km 40 e 54.

Rampa batida 5%

Cálculo

- 1) Sentido ascendente:  $r_i = 10i = 50\text{kg/t}$

$$L_v = 14 + \frac{1}{15} (14 \times 50) = 14 + 46,7 = 60,7 \text{ km}$$

$$L_v = \frac{60,7}{14} = 4,33$$

- 2) Sentido descendente

$$L_v = 14 - 0,57 \times 14 = 14 - 8 = 6 \text{ km}$$

$$L_v = \frac{6}{14} = 0,43 \dots$$

2. Calcular o comprimento virtual no sentido exportação de uma estrada com as seguintes características:

Km 0 ao 10 - rampa de 1%

Km 10 ao 18 - rampa de -2%

Km 18 ao 22 - rampa de + 4%

Km 22 ao 30 - rampa de + 1,5%

Km 30 ao 40 - em nível

Km 40 ao 54 - rampa de - 5%

Km 54 ao 65 - em nível

Calcular também o coeficiente virtual.

$$\begin{aligned} L_v &= 65 + \frac{1}{15} (10 \times 10 + 4 \times 40 + 8 \times 15) - 14 \times 0,57 = \\ &= 65 + \frac{1}{15} (100 + 160 + 120) - 8 = \end{aligned}$$

$$= 65 + \frac{380}{15} - 8 = 65 + 24 - 8 = 81 \text{ km}$$

Portanto:  $L_v = \frac{81}{65} = 1,25$



B I B L I O G R A F I A

1. C. Stevenson - "Das Resistências dos trens e suas aplicações"-  
- 1930
2. Felice Corini - "Scienza e Tecnica delle Construzioni Stradale  
e Ferróviarie" - Milano - 1947.
3. Highway Research Board: "Time and Gasolina Consumption in Mo-  
tor Truck Operation" - Research Report nº 9 - 1 950.
4. Ricardo B. P. B. Schoroeder - "Mecânica da Locomoção dos Auto-  
veículos" - 1 963.

Í N D I C E

	pag
1. Introdução ,.....	I
2. Generalidades .....	1
3. Conceitos e definições .....	4
4. Comprimento virtual das rodovias .....	6
5. Conclusões .....	23
6. Exemplos de Aplicação .....	24
7. Bibliografia .....	26