

# A aderência nas unidades motoras em tracção ferroviária. Potência dos motores de tracção

CARLOS MANUEL PEREIRA CABRITA

Eng.º Electrotécnico (I. S. T.)

Assistente (I. S. T.)

## resumo

Nas locomotivas e nas automotoras, em cada instante da sua marcha, o valor máximo da força de tracção (coeficiente de aderência  $\times$  peso aderente) não deve ser ultrapassado.

Neste trabalho são analisadas as causas da patinagem das rodas motoras: aumento da força de tracção, diminuição do coeficiente de aderência e desigual repartição do peso aderente pelos rodados.

Com base nas características aderência-velocidade são ainda apresentadas as equações da potência aplicável aos rodados (máxima potência dos motores de tracção), para as locomotivas eléctricas com eixos independentes e com bogies monomotores.

## abstract

In the locomotives and motor-coaches, at any instant of their motion the maximum value of the tractive effort (coefficient of adhesion  $\times$  adhesive weight) must not be exceeded.

In this paper, the causes of the slip of the driving wheels are analysed: increase of the tractive effort, decrease of the coefficient of adhesion and unequal distribution of the adhesive weight on the axles.

Based on the adhesion-speed characteristics, the equations of the power output from driving axles (maximum output of the traction motors), for the electric locomotives with individual axles and monomotor bogies, are also presented.

## 1 — GENERALIDADES

A finalidade dos motores de tracção instalados nas locomotivas e nas automotoras consiste em transmitir aos respectivos rodados um binário igual e oposto ao binário resistente. Sendo  $R$  o raio das rodas e  $M$  o binário motor, a força de tracção nas jantes, isto é, nos contactos roda-carril, será

$$Z = \frac{M}{R} \quad (1)$$

O binário  $M$  pode ser representado por duas forças iguais e opostas, uma  $Z$  aplicada no ponto de contacto das rodas com os carris e tendente a fazer recuar estes, e a outra  $Z'$  aplicada ao veio do rodado e tendente a fazer avançar o veículo (fig. 1).

A tracção é possível apenas devido ao fenómeno da aderência, devendo verificar-se, para que a marcha seja estável a qualquer velocidade, a relação

$$Z \leq \mu P \quad (2)$$

em que  $\mu$  representa o coeficiente de aderência roda-carril e  $P$  o peso exercido pelo rodado sobre os carris (peso aderente).

A partir desta última relação, atendendo a que  $Z = ma$  e  $P = mg$ , obtém-se

$$a \leq \mu g \quad (3)$$

concluindo-se assim que a aderência condiciona as acelerações em caminho de ferro.

A pressão nos contactos roda-carril é bastante elevada, ultrapassando normalmente o limite de elasticidade do material. Contudo não se verifica uma deformação permanente, na medida em que o volume submetido àquela pressão é muito reduzido, sendo a deformação plástica contrariada pelas partes do material que rodeiam esse volume. Por conseguinte, verificar-se-á uma pequena deformação elástica, que fará com que as rodas e os carris penetrem ligeiramente um no outro, aumentando consideravelmente a atracção molecular. Este fenómeno, à escala macroscópica, representa a aderência, aderência essa que depende da natureza e do estado das superfícies

em contacto. Assim, por exemplo, a existência de uma camada oleosa ou de humidade sobre os carris diminui aquela atracção molecular e, consequentemente, o valor do coeficiente de aderência.

## 2 — FENÓMENO DA PATINHAGEM. «CABRAGE» DOS BOGIES

No arranque, quando o limite de aderência correspondente ao estado dos carris é ultrapassado, isto é, quando a força aplicada às jantes é superior a  $\mu P$ ,

$$Z > \mu P \quad (4)$$

devido a um aumento de  $Z$  ou a uma redução quer do coeficiente de aderência quer do peso exercido pelos rodados sobre os carris, as rodas patinham, isto é, rodam sem que a locomotiva se movimente. Este fenómeno pode acontecer em vários rodados motores simultaneamente.

### a) Aumento da força de tracção

Contrariamente ao que se passa no plano horizontal, nas subidas o peso apresenta uma componente segundo uma direcção paralela ao plano, o que provoca um aumento considerável da resistência ao movimento, que será tanto mais elevada quanto maior for o declive.

Normalmente, as linhas principais têm um traçado em que os declives máximos são da ordem dos  $10\text{‰}$  a  $11\text{‰}$ ; contudo nas linhas consideradas de montanha podem atingir os  $50\text{‰}$ .

Na medida em que quanto maior for o declive tanto mais elevada terá que ser a força de tracção para que a resistência ao movimento seja vencida, corre-se o risco do limite de aderência ser ultrapassado, o que aliás acontece em rampas bastante pronunciadas. Daí que se recorra a veículos de aderência total, em que o aumento necessário da força de tracção é compensado por um aumento do peso aderente, bem como à tracção por cremalheira, como é o caso, por exemplo, das linhas de montanha suíças. O emprego da cremalheira consegue assegurar a tracção em rampas com um declive de  $400\text{‰}$ .

### b) Diminuição do coeficiente de aderência

Todas as máquinas são equipadas com um reservatório de areia, areia essa cuja finalidade é melhorar o coeficiente de aderência, para que as patinhagens provocadas normalmente por carris oleosos ou húmidos sejam eliminadas. A areia é projectada para as zonas de contacto das rodas com os carris por intermédio de ejectores electro-pneumáticos.

Se bem que a areia permita compensar a diminuição do coeficiente de aderência nas circunstâncias apontadas,

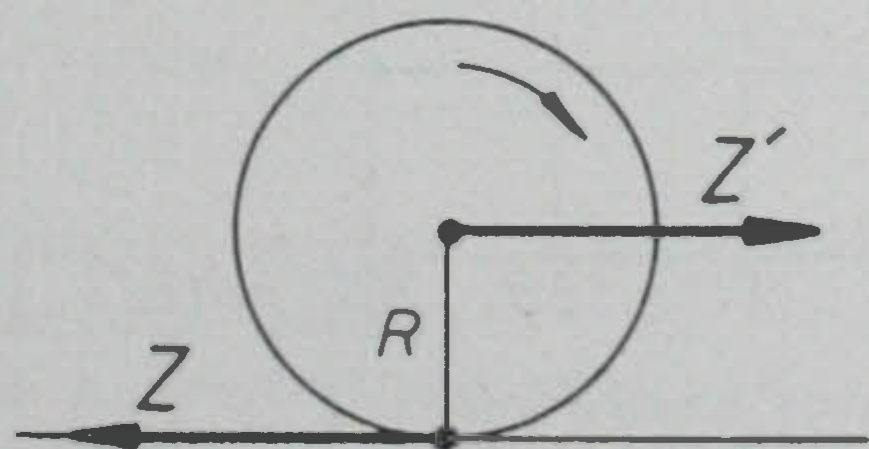


Fig. 1 — Binário motor

apresenta por vezes o inconveniente de originar uma camada mais ou menos isolante entre as rodas e os carris, dificultando um pouco, aparentemente, na tracção eléctrica, o retorno da corrente de tracção aos carris.

A aderência nas locomotivas com bogies monomotores é superior à aderência das locomotivas com rodados de accionamento independente. Com efeito, nas primeiras a patinhagem individual dos rodados é contrariada pela inércia dos restantes rodados do mesmo bogie, enquanto que nas segundas, a força que se opõe à patinhagem de cada rodado é inferior e permanecerá mais baixa que a força de tracção, podendo esta provocar o embalamento dos rodados que patinham bem como dos respectivos motores de tracção.

### c) Diminuição do peso aderente. «Cabrage» dos bogies

Assim que os motores de tracção começam a rodar verifica-se uma desigualdade na repartição do peso aderente pelos rodados do bogie, devido à acção do binário motor.

Como a resistência à tracção é aplicada ao nível do pivot, a uma altura  $H$  do plano da via, contrariamente à força de tracção, que é aplicada aos eixos a uma altura  $R$ , resultará um momento, denominado momento de «cabrage» (empinamento), que provocará uma redução de  $f_1$  na carga estática do rodado da frente e um aumento igual na carga estática do rodado de trás.

Por outro lado, como os motores de tracção ao arrancarem exercem ambos uma reacção  $f'_2$  no ponto  $P_3$ , verificar-se-á um outro momento de «cabrage» que provocará, por sua vez, uma diminuição de  $f_2 = f'_2$  na carga do rodado dianteiro e um aumento igual na carga do rodado traseiro.

Por conseguinte, enquanto que o rodado dianteiro é aliviado de  $f = f_1 + f_2$  o rodado traseiro é sobrecarregado de  $f = f_1 + f_2$  (fig. 2).

Teremos assim (fig. 2),

$$Z(H-R) = f_1 d \quad (5)$$

$$Z R = f'_2 d \quad (6)$$

ou seja,

$$f'_1 = f_1 = Z \frac{H-R}{d} \quad (7)$$

$$f'_2 = f_2 = Z \frac{R}{d} \quad (8)$$

$$f' = f = f_1 + f_2 = Z \frac{H}{d} \quad (9)$$

A força de tracção máxima a aplicar ao rodado dianteiro, para que não patinhe, será então

$$Z = \mu \left( P - Z \frac{H}{d} \right) \quad (10)$$

donde

$$Z = \frac{\mu}{1 + \mu \frac{H}{d}} P \quad (11)$$

e ao rodado traseiro,

$$Z = \mu \left( P + Z \frac{H}{d} \right) \quad (12)$$

ou seja

$$Z = \frac{\mu}{1 - \mu \frac{H}{d}} P \quad (13)$$

Na prática, a redução do peso aderente no rodado da frente e o seu aumento no rodado de trás corresponde a verificar-se, no primeiro dos rodados, uma diminuição da aderência de  $\mu$  a  $\mu/(1 + \mu H/d)$ , e no segundo, um aumento de  $\mu$  a  $\mu/(1 - \mu H/d)$ .

Em muitos dos arranques, sobretudo com os carris molhados, a patinagem não passa, de um modo geral, dum fenómeno transitório de muito curta duração, na medida em que o calor desenvolvido pelo atrito nos contactos das rodas que patinham com os carris, melhora

substantialmente a aderência nesses pontos de contacto, permitindo logo de seguida o arranque em boas condições. Todavia, se a patinagem persistir é conveniente reduzir ou mesmo eliminar a força de tracção, através de dispositivos automáticos de anti-patinagem, para que se evite não só o embalamento dos motores mas também o desgaste excessivo da mesa de rolamento das rodas.

O comportamento dos motores de tracção face à patinagem é condicionado pela forma da característica binário-velocidade. Com efeito, se ela for muito inclinada, a um pequeno aumento da velocidade corresponderá uma redução acentuada da força de tracção.

Nas modernas locomotivas monofásicas suíças a 15 kV — 16 2/3 Hz, de grande potência (Re 4/4 Bo' Bo' — 6500 CV e Re 6/6 Bo' Bo' Bo' — 10 900 CV) os enrolamentos de campo dos motores de tracção, do tipo monofásico série com colectador, estão ligados entre si por uma equipotencial de modo a que, quando um motor tem tendência a embalar é-lhe imposta uma característica shunt que lhe limitará a velocidade.

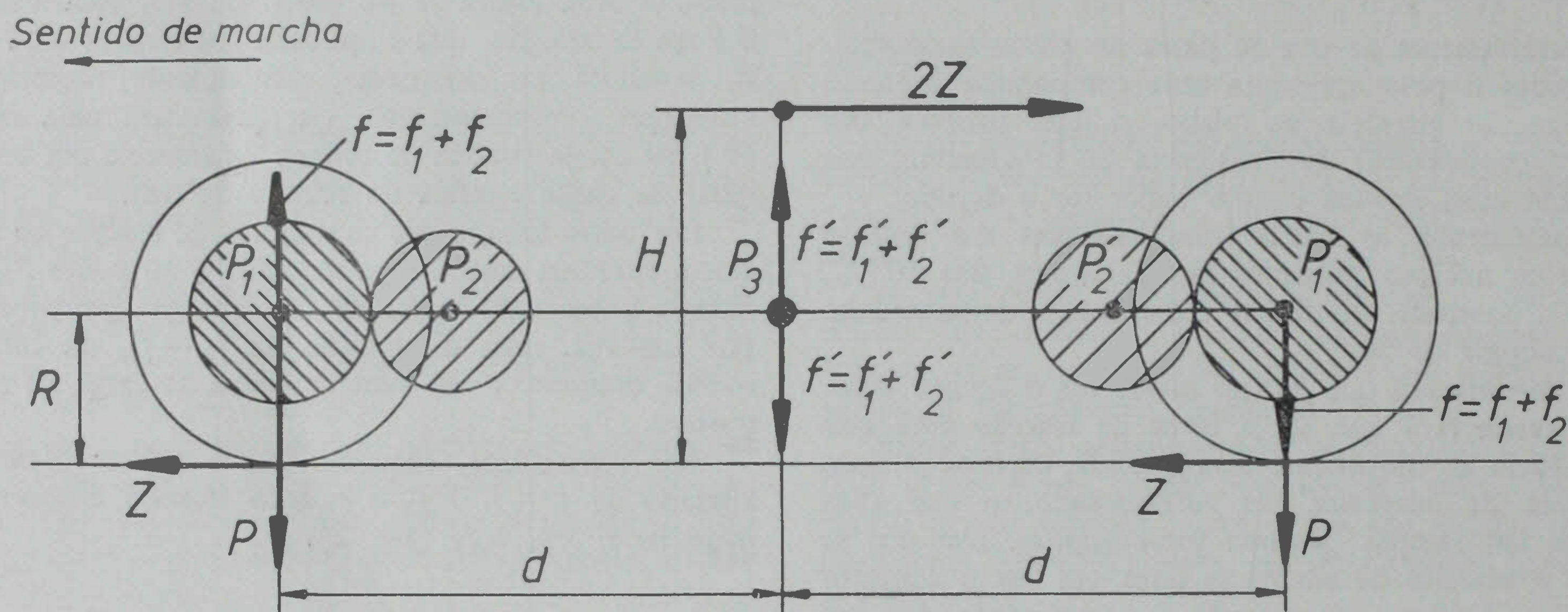


Fig. 2 — Efeito de «cabrage»

$P_1, P_1'$  — eixos dos rodados  
 $P_2, P_2'$  — eixos dos motores de tracção  
 $P_3$  — ponto de apoio dos motores de tracção

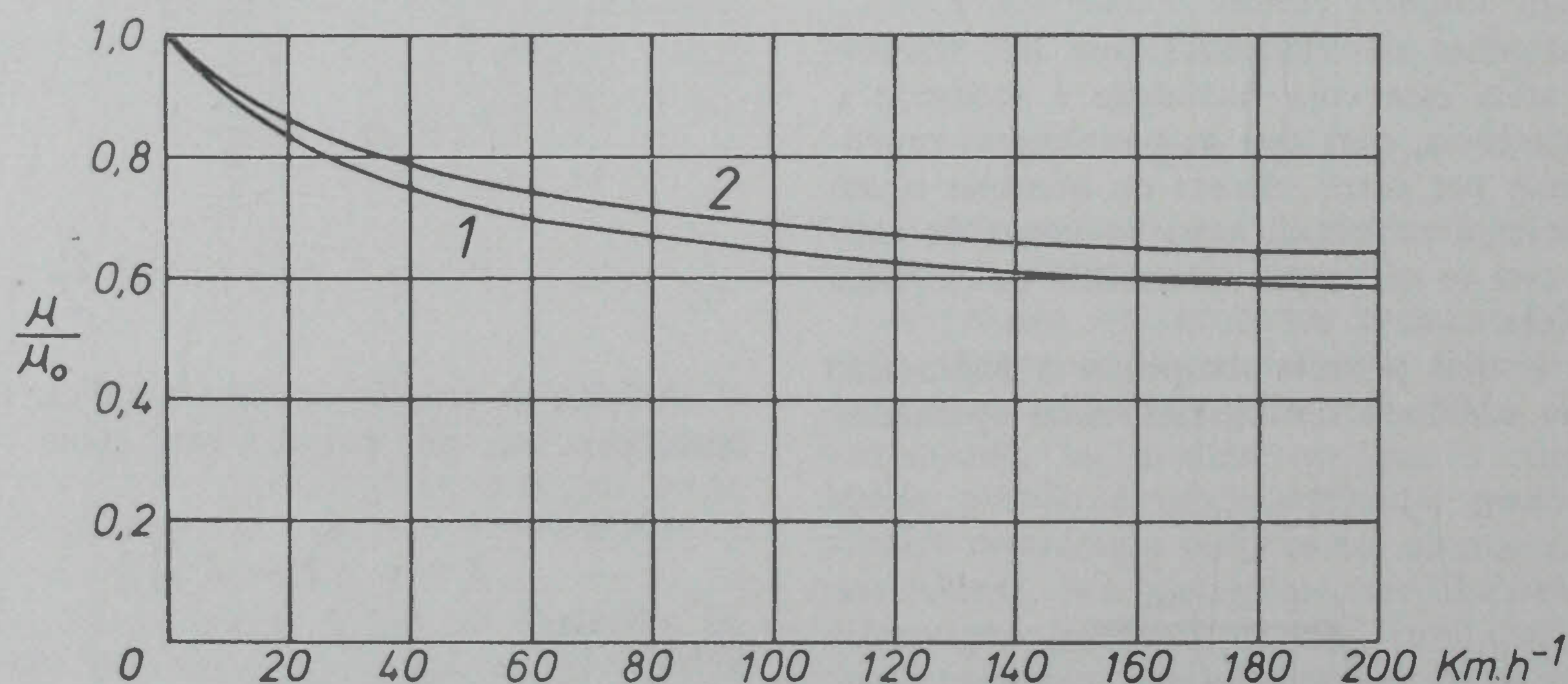


Fig. 3 — Andamento do coeficiente de aderência com a velocidade

1 — locos com eixos independentes  
 2 — locos com bogies monomotores

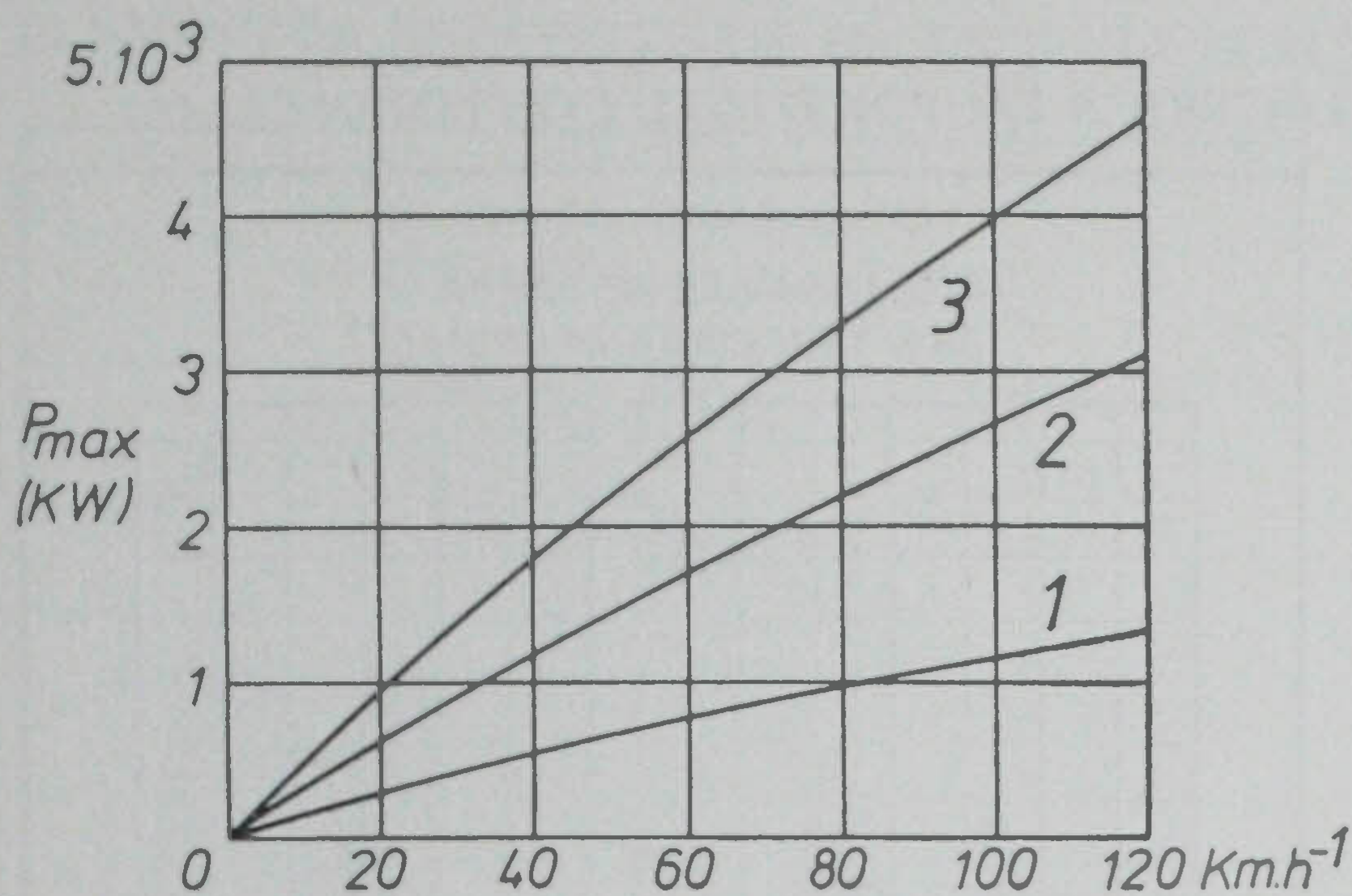


Fig. 4 — Potência máxima dos motores de tracção (locomotivas monofásicas e locomotivas de corrente contínua com talhadores).  $P = 20$  ton,  $\mu_0 = 0,33$  (eixos independentes — curva 1),  $\mu_0 = 0,35$  (bogies monomotores: tipo B — curva 2, tipo C — curva 3)

### 3 — VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ADERÊNCIA COM A VELOCIDADE

Se bem que, teoricamente, este coeficiente seja independente da velocidade, constata-se, na prática, que ele diminui, diminuição essa que pode ser explicada pelas seguintes causas:

- Irregularidades na mesa de rolamento dos carris, provocadas pelas juntas de ligação, pelas agulhas, por desgastes anormais, etc. Estas irregularidades dão origem a choques nas rodas, tendo a suspensão um papel determinante no seu amortecimento;
- Ligeira diferença entre os diâmetros das duas rodas de um mesmo rodado;
- Suspensão em más condições;
- Oscilações da locomotiva, tanto mais intensas quanto maior é a velocidade.

Todos estes fenómenos originam uma desigualdade na repartição do peso aderente pelos rodados. Com base em ensaios realizados em França foram deduzidas as seguintes fórmulas empíricas para o coeficiente de aderência [1]:

- Locomotivas com eixos independentes

$$\mu = \mu_0 \frac{8 + 0,1 V}{8 + 0,2 V} \quad (14)$$

- Locomotivas com bogies monomotores

$$\mu = \mu_0 \frac{8 + 0,1 V}{8 + 0,18 V} \quad (15)$$

em que  $V$  ( $\text{km.h}^{-1}$ ) representa a velocidade e  $\mu_0$  o coeficiente de aderência médio ( $V = 0$ ). Na figura 3 estão representadas as respectivas curvas  $\mu(V)$ .

Por conseguinte, os valores máximos da força de tracção serão dados pelas expressões:

- Locomotivas com eixos independentes

$$Z = \mu_0 \frac{8 + 0,1 V}{8 + 0,2 V} P \quad (16)$$

- Locomotivas com bogies monomotores

$$Z = \mu_0 \frac{8 + 0,1 V}{8 + 0,18 V} P \quad (17)$$

Na prática, a força máxima disponível para a tracção de um comboio é igual à força de tracção máxima nas jantes subtraída da força necessária ao movimento da locomotiva.

Quanto a  $\mu_0$ , o seu valor dependerá não só do estado dos carris no arranque como também do tipo de locomotiva. Segundo [1], nas locomotivas monofásicas e nas locomotivas de corrente contínua com «hacheurs» (tiristores em montagem de talhadores), em arranques com tempo seco, pode-se considerar  $\mu_0 = 0,33$  se os rodados forem de accionamento independente e  $\mu_0 = 0,35$  se os bogies forem monomotores.

### 4 — POTÊNCIA DOS MOTORES DE TRACÇÃO

A potência máxima que pode ser transmitida pelos motores de tracção aos rodados das locomotivas é, em cada instante, igual ao produto da força de tracção e da velocidade. Portanto, a potência de cada motor, atendendo a (16) e (17), será:

- Locomotivas com eixos independentes

$$P_{\max} = 2,725 \mu_0 \frac{8 + 0,1 V}{8 + 0,2 V} P V \quad (18)$$

- Locomotivas com bogies monomotores

$$P_{\max} = 2,725 n \mu_0 \frac{8 + 0,1 V}{8 + 0,18 V} P V \quad (19)$$

sendo  $n$  o número de rodados (eixos) de cada bogie (2 nas locos BB e 3 nas locos CC).

Em ambas as expressões tem-se  $P_{\max}$  (kW),  $P$  (ton) e  $V$  (km/h).

A carga máxima por rodado,  $P$ , é limitada pela resistência mecânica dos carris, e normalmente situa-se nas 20 ton. Na figura 4 representa-se a potência  $P_{\max}$  em função da velocidade, para as locomotivas monofásicas e para as locomotivas de corrente contínua com «hacheurs», para  $P = 20$  ton.

### BIBLIOGRAFIA

- BOILEAU, ROBERT — *Traction Électrique*; Techniques de l'Ingénieur, D 810, 1974.
- A. T. DOVER — *Electric Traction*; Pitman & Sons, Londres, 1963.
- PATIN, PIERRE — *La Traction Électrique et Diesel-Électrique*; Eyrolles, Paris, 1954.
- SIE, MOSER, DUNNER — *Insertion de connexions équipotentielle entre les champs des moteurs série monophasés d'engins de traction*; Bulletin Oerlikon 368/369, Setembro 1966, p. 36-47.
- STREIFF — *La locomotive Bo' Bo' Bo' série Re 6/6 des Chemins de fer fédéraux suisses (CFF)*; Revue Brown Boveri 12-77, Dezembro 1977, p. 688-700.