

Estudo da Força de Resistência ao Rolamento aplicada a Pontes Rodoviárias

José Luis Arenas Font ⁽¹⁾; Francisco Raúl Casanella Leyva ⁽²⁾; Ilal, Isac Ismael Quenchane Agy Ilal ⁽³⁾;
Fernando Leite ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Instituto Superior de Transporte e Comunicações (ISUTC), Prol. Av. Kim Il Sung, Ed. D1, Maputo, Moçambique

⁽²⁾ Universidade de Holguín, Departamento de Engenharia Civil, CUBA

⁽³⁾ Instituto de Transporte e Comunicações (ISUTC), Prol. Av. Kim Il Sung, Ed. D1, Maputo, Moçambique

⁽⁴⁾ Instituto de Transporte e Comunicações (ISUTC), Prol. Av. Kim Il Sung, Ed. D1, Maputo, Moçambique.
E-mail de contacto: jlsand2005@gmail.com

Resumo - Este estudo dedica-se à análise da força de rolamento em pontes rodoviárias. O objetivo foi de determinar os valores do projeto, bem como o correspondente campo de atuação; fazendo uso dos métodos de observação, indução-dedução, análise e síntese. É exposta a sua origem, as formas gerais de estimá-la, bem como a particularização destas para o caso de pontes rodoviárias e, por fim, a obtenção de formulações lineares contínuas aplicáveis ao comboio N-30 até 1000m de comprimento carregado.

Palavras-chave: Força de Rolamento - Pontes - Pneumáticos - Pavimento

I. INTRODUÇÃO

Começa por expor a tipologia dos pneus, depois mostra as diferentes forças que atuam durante o seu movimento, e dentro delas, a força de resistência ao rolamento. A ênfase é colocada - fundamentalmente - no coeficiente de resistência ao rolamento. Continua com a apresentação dos diferentes procedimentos para obtê-lo e termina com uma análise ou discussão dos valores extremos que pode adotar. Estes resultados são aplicados ao comboio N-30, determinando expressões lineares que relacionam a força de rolamento desta caravana com o comprimento carregado.

A. Tipos de Pneus

Um pneu é uma estrutura flexível em forma de toróide preenchida com ar comprimido. O elemento estrutural mais importante do pneu é a sua camada interna. É composto por uma ou mais camadas de cordões flexíveis com alto módulo de elasticidade envoltos em uma matriz de componentes de borracha com baixo módulo de elasticidade¹

O desenho e a construção da camada interna (carcaça) determinam, em grande medida, as características do pneu. Entre os vários parâmetros de *design*, a disposição geométrica dos cordões de borracha, particularmente as suas direções, desempenha um papel significativo no desempenho do pneu. A direção dos talões é geralmente definida pelo ângulo da coroa, que é o ângulo entre o talão e o eixo circunferencial do pneu²

Quando os talões têm um ângulo de coroa pequeno, o pneu tem Os pneus são classificados em dois tipos [27] [30]:

- Camadas distorcidas
- Camadas Radiais

No pneu de capa diagonal, as cordas estendem-se num ângulo de aproximadamente 40 graus em relação ao eixo circunferencial do pneu. Um pneu diagonal tem duas capas para cargas leves e até 20 para veículos pesados. Os cabos nas camadas adjacentes são orientados em direções opostas. Em funcionamento, as camadas diagonais dobram-se, alongando os elementos³ em forma de diamante. Eles oferecem um manuseio mais suave, mas o desempenho nas curvas e a resistência ao desgaste são ligeiramente inferiores aos dos pneus radiais [30].

O pneu de capa radial foi introduzido pela primeira vez pela Michelin em 1948. Neste caso, os talões do piso estão num ângulo de aproximadamente 20 graus. A vida útil de um pneu de capa radial pode ser até o dobro da vida útil de um pneu de capa diagonal, em condições semelhantes⁴. O desempenho em curva desses pneus é bom em comparação com os pneus diagonais e tem melhor resistência ao desgaste. No entanto, em estradas difíceis (esburacadas), o conforto de condução é um pouco menor do que com um pneu diagonal [30].

¹ ver [27] p.4. parágrafo 2

² Idem pág.4. parágrafo 4

³ ver [27] p.4-6

⁴ Vide p.6 parágrafo 2

Para o pneu de capa radial, a pressão de contato entre o pneu e a superfície é relativamente uniforme, enquanto nos pneus de capa diagonal esta pressão varia muito de um ponto a outro⁵

O uso de pneus radiais é predominante em automóveis de passageiros e caminhões pesados. O pneu de capa inclinada é utilizado principalmente em ciclos, motocicletas, máquinas agrícolas e alguns equipamentos militares⁶.

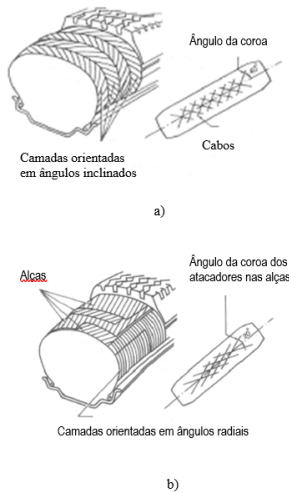


figura 1. Tipos de neumáticos a) de capas inclinadas b) de capas radiais (tomado de [27] p 5)

B. Forças que actuam no Pneu Movimento

Será analisado o caso da roda elástica movendo-se sobre uma superfície “rígida”⁷. Este caso é ilustrado na figura 2:

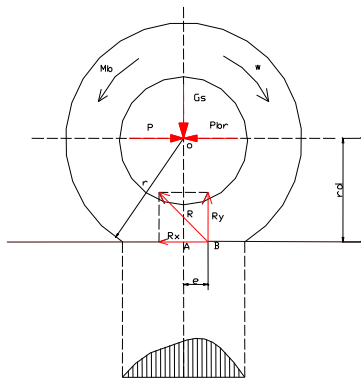


Figura 2. Forças e momentos que atuam sobre a roda elástica a qual rola sobre uma superfície rígida

Onde:

G_s - Carga vertical na roda livre, considerando seu próprio peso.

P - Força horizontal que faz com que a roda se mova.

P_{br} - Força de inércia da roda devido ao seu movimento não uniforme.

M_{br} - Momento devido à inércia da roda, quando ela se move com movimento não uniforme.

R_x - Componente horizontal da reação da estrada.

R_y - Componente vertical da reação da estrada.

rd - Raio dinâmico do pneu.

e - Distância do ponto de aplicação da reação da estrada ao eixo vertical de simetria da roda

Para o caso de movimento com velocidade angular constante (figura 3), a força P_{br} e o momento M_{br} são zero e pode-se formar o seguinte sistema de equações:

$$P - R_x = 0$$

$$G_s - R_y = 0$$

$$R_x \cdot rd - R_y \cdot e = 0$$

obtem-se a expressão de R_x :

$$R_x = G_s \cdot \frac{e}{rd}$$

Onde:

e/rd : coeficiente de resistência ao rolamento

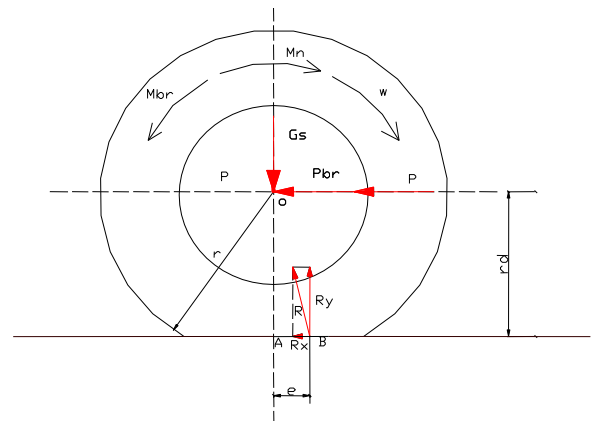


figura 3. Forças e momentos que atuam sobre uma roda motriz a qual roda sobre uma superfície rígida com movimento não acelerado.

Outra forma de definir o coeficiente de resistência ao rolamento é:

⁵ Ibidem

⁶ Ibidem

⁷ Pavimentos feitos de concreto hidráulico ou asfáltico são chamados – neste trabalho – de superfície rígida.

$$f = \frac{e}{rd} = \frac{P}{Gs}$$

II. MÉTODOS PARA DETERMINAR O COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

O coeficiente de resistência ao rolamento de uma roda motriz ou roda livre pode ser determinado pelos seguintes fatores:

- Relação entre a distância do ponto de aplicação da reação da estrada ao eixo vertical de simetria da roda (e) e o raio dinâmico (rd), que é a distância entre o centro da roda e a estrada.
- Relação entre a força de resistência ao rolamento (R_x) e a carga vertical aplicada no centro da roda.
- Estes dois factos permitem-nos considerar que:
- O coeficiente de resistência ao rolamento depende das condições de funcionamento da roda, do desenho do pneu e do tipo de estrada.
 - O coeficiente de resistência ao rolamento pode ser determinado investigando o valor da força de resistência ao rolamento e conhecendo a força vertical aplicada à roda.

As condições de trabalho de uma roda de automóvel podem ser determinadas principalmente por: pressão no pneu, valor de torque transmitido pela roda, velocidade de movimento da roda e carga vertical aplicada a ela.

O *design* do pneu determina as suas características de elasticidade radial, transversal e circunferencial, bem como o padrão do piso.

Determinar todos os fatores que afetam os valores de e e rd e, portanto, o coeficiente de resistência ao rolamento, é praticamente impossível. Devido a isso, o coeficiente de resistência ao rolamento é determinado através de trabalhos experimentais.

⁸ métodos para obter o coeficiente de resistência ao rolamento são divididos em

- Métodos dependendo do tipo de superfície.
- Métodos dependendo da velocidade de circulação.
- Métodos dependendo da carga que desce pelo pneu.

A.2 Métodos dependendo do tipo de superfície

Abaixo estão⁸ métodos para determinar o coeficiente de resistência ao rolamento, com base na afirmação acima. Eles são::

1. Métodos dependendo do tipo de estrada
 - Método dependendo do tipo de superfície
 - Método dependendo do tipo de superfície e do tipo de veículo

- Método dependendo da pressão de inflação e do tipo de superfície
- Método dependendo do diâmetro do pneu e do tipo de superfície

2. Métodos baseados na velocidade

- Método **Hahn**
- Métodos dependendo do tipo de pneu e velocidade para veículos leves.
- Método dependendo do tipo de pneu e velocidade para caminhões

3. Métodos de acordo com a carga vertical que desce pelo pneu.

- Método de acordo com carga vertical e pressão de inflação

B. 2 Método dependendo do tipo de estrada

Utilizando este método proposto em [23], o coeficiente de resistência ao rolamento é determinado experimentando um carro para diferentes condições de estrada.

A tabela número 1 apresenta os valores do coeficiente de resistência ao rolamento do automóvel, para diferentes tipos de estrada.

Os valores mais baixos do coeficiente f correspondem a estradas em bom estado e os mais elevados, o estado da estrada é mau ⁹.

Tabela 1: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento (f), do automóvel para distintos tipos de caminho (segundo [23] p.39)

Tipo de estrada	F
Concreto	0,010-0,020
Asfalto	0,012-0,022
Paralelepípedos	0,015-0,025
Pavimentou	0,025-0,060

C.2 Método dependendo do tipo de superfície e do tipo de veículo

Em [27] é proposto um método para estimar o coeficiente de resistência ao rolamento em função do tipo de veículo (veículos leves e caminhões) e do tipo de superfície.

Tabela 2: Coeficiente de resistência ao rodamento (f) (tomado de [27] p.18)

Superfície	F
pneu de automóvel	
Concreto asfáltico	0,013

⁸ Em [27] aparecem outros métodos para calcular f , dentre os quais se destacam: a temperatura interna do pneu, esforço de tração, etc. (N. de A.)

⁹ O método não conceitua os termos mau estado e bom estado. Contudo, considerar uma estrada em más condições técnicas parece - além de conservador - longe de qualquer consideração de projeto. (N. de A.)

Cascalho	0,020
Macadame	0,025
estrada não pavimentada	0,05
Campo	0,1-0,35
pneu de caminhão	
Concreto asfáltico	0,006-0,01

D.2 Método dependendo da pressão de inflação e do tipo de superfície

Neste método, proposto em [27], o coeficiente de suporte é determinado para solos soltos (areias) e solos consolidados, bem como para concreto hidráulico. Tudo numa faixa entre dez e quarenta *psi* de pressão de inflação, o que o torna exclusivo para veículos leves.

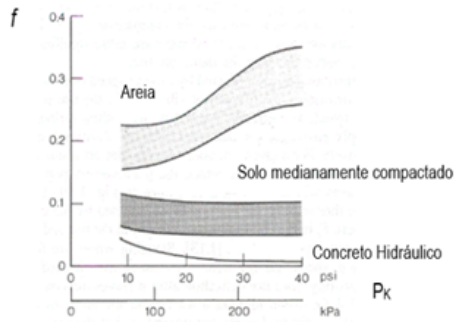


figura 4: Variação do coeficiente de resistência ao rolamento f com a pressão de inflação do pneu em várias superfícies [copiado 23 p.13]

E.2 Método dependendo do diâmetro do pneu e do tipo de superfície

Neste método, proposto em [27], o coeficiente de rolamento é determinado para solos soltos (areias) e solos consolidados, bem como para concretos na faixa entre 0,50-1,50 metros de diâmetro de **pneu**.

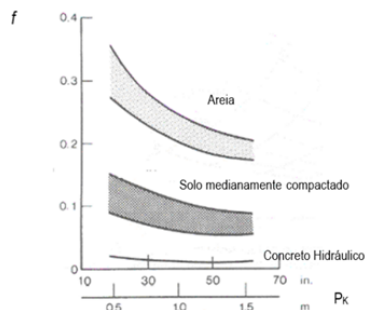


figura 5: Variação do coeficiente de resistência ao rolamento (f) com o diâmetro do pneu de [27] p.16

F.2 Métodos dependentes da velocidade.

Método Hahn

A dependência entre o coeficiente de resistência ao rolamento de um pneu e sua velocidade de movimento é determinada por várias equações empíricas. Uma delas, demonstrada por **Hahn**¹⁰, para um determinado tipo de pneu, é a seguinte:

$$f = \frac{0.019}{\sqrt[3]{Pk^2}} + \frac{0.00245}{\sqrt{Pk}} * \left(\frac{V}{100} \right)^2 + \frac{0.00420}{\sqrt[3]{Pk^4}} * \left(\frac{V}{100} \right)^3$$

Onde:

Pk - Pressão no pneu (kg/cm^2)

V - Velocidade de deslocamento do pneu (km/h)

G.2 Métodos dependendo do tipo de veículos, pneus e velocidade de condução

Esses métodos, mostrados em [27], foram obtidos em superfícies rígidas. A Figura 6, para pneus diagonais e radiais de automóveis de passageiros, sob cargas fixas e pressão de inflação, mostra a relação entre o coeficiente de resistência ao rolamento e a velocidade (V) (até 150 km/h ou 93 mph), que também pode ser expresso –para pneus de capa radial por :

$$f = 0.0136 + 0.40 \cdot 10^{-7} \cdot V^2$$

e no caso de pneus diagonais em automóveis de passageiros. A expressão analítica é:

$$f_r = 0.0169 + 0.19 \cdot 10^{-6} \cdot V^2$$

Onde

V

- Velocidade

[km/h].

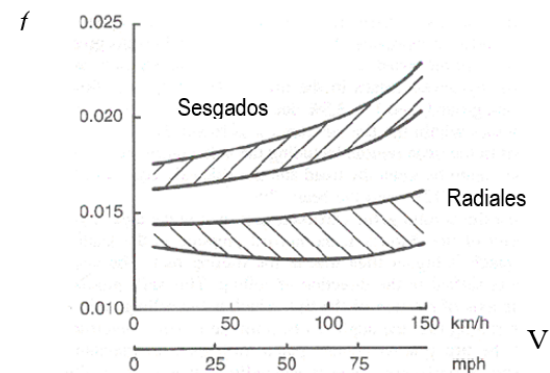


figura 6 Variação do coeficiente de resistência ao rolamento (f) com relação a velocidade para veículos leves segundo o tipo de pneumáticos (copiado de [27] p.10)

H.2 Método dependendo do tipo de pneu e velocidade para caminhões

A Figura 7, para pneus diagonais e radiais de caminhão, sob cargas fixas e pressão de inflação, mostra a relação entre o coeficiente de resistência ao rolamento e a

¹⁰ Veja [23] p.36

velocidade V (até **100 km/h** ou **62 mph**), que também pode ser expresso –para camadas distorcidas- por:

$$fr = 0.006 + 0.23 \cdot 10^{-6} \cdot V^2$$

e para pneus de caminhão com capa diagonal:

$$fr = 0.007 + 0.45 \cdot 10^{-6} \cdot V^2$$

Onde:

V - Velocidade [km/h].

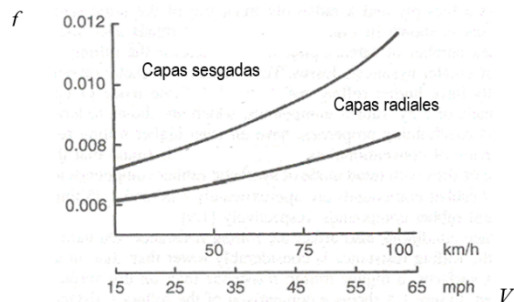


figura 7 Coeficiente de resistência ao rolamento (f), para pneumáticos de capas desgastadas e radiais de camiões em função da velocidade de baixa carga e pressão de inflado constantes (copiado de [23] p.10)

1.2 Métodos de acordo com a carga vertical que desce pelo pneu.

J.2 Método de acordo com carga vertical e pressão de inflação

Em [23] foi estudada a influência da carga vertical sobre uma roda no valor do coeficiente de resistência ao rolamento f , analisada através do estudo experimental de uma roda. Os experimentos foram realizados para velocidade constante (V) e pressão variável (P_k). Os estudos foram realizados em uma faixa de cargas verticais no pneu entre **0,2 e 0,5 toneladas**.

Para pressão constante dos pneus, o aumento da carga vertical provoca um pequeno aumento no valor do coeficiente de resistência ao rolamento.

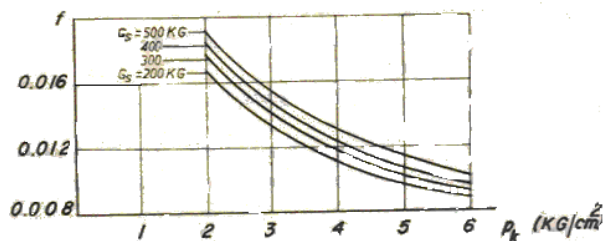


figura 8 Coeficiente de resistência ao rolamento (f), em função a carga vertical (G_s) e a pressão (P_k) (copiado de [23] p.37)

III. VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO COM A TEXTURA SUPERFICIAL DO PAVIMENTO

Da mesma forma, em [27] aparece uma classificação das superfícies com base em suas Micro e Macro texturas, que é mostrada no gráfico a seguir.

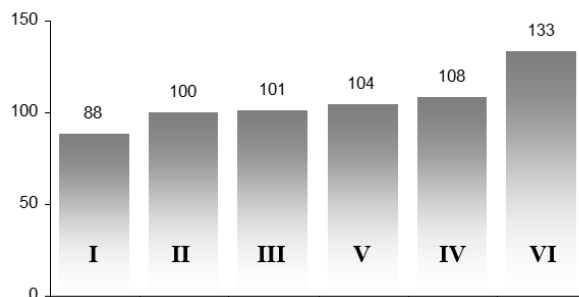


figura 9 Relação percentual entre os coeficientes de resistência ao deslizamento em diferentes superfícies , com aspecto concreto asfáltico novo (copiado de [27] p.11)

Tabela 3: Denominações, descrição e relação com a textura de diferentes superfícies de pavimentos

Denominação	Descrição	Textura	
		Microtextura	Macrotextura
I	Concreto hidráulico polido	SUAVE	SUAVE
II	Novo concreto hidráulico	SUAVE	GROSSA
III	Concreto asfáltico com agregado arredondado, compactado com rolo	MEDIA	DE LEVE A MÉDIO
IV	Concreto asfáltico compactado com rolo I	MEDIA	MEDIO
V	Concreto asfáltico compactado com rolo II	DE MÉDIO A ÁSPERO	MEDIO
VI	Concreto asfáltico com revestimento espesso	ÁSPERA	GROSSA

IV. DISCUSSÃO

A.4 Métodos e situações de interesse estrutural

Forças horizontais, como força centrífuga ou força de frenagem, são de interesse na análise de estruturas como pontes. A resistência ao rolamento tem interesse prático? Seus valores podem ser superiores aos da força de frenagem?

O objetivo desta seção é discretizar os métodos e situações que podem ser úteis para a análise de pontes e - consequentemente - responder às questões anteriores.

Quais são essas situações?

Será seguida a ordem da tipologia dos métodos, exposta no subcapítulo anterior.

Dos **métodos dependendo do tipo de superfície**, a situação se baseia em dois deles:

1. Concreto asfáltico
2. Concreto Hidráulico

Dentro desses métodos aparece uma série de variáveis, que são:

- Tipo de Veículo.
Aparentemente a decisão parece recair sobre os veículos pesados (lembre-se do comboio N-30), mas acontece que são precisamente estes que têm pneus menos deformáveis e aos quais são aplicadas pressões de inflação mais elevadas. Portanto, por enquanto os leves também serão levados em consideração.
- pressão da inflação
As pressões de inflação usadas em caminhões variam entre **620-827 kPa (90-120 psi)** e aqueles usados em veículos leves variam na faixa entre **193-248 kPa (28-36 psi)** ¹¹
Além desses intervalos, serão utilizados os necessários]
- Diâmetro do pneu
Em veículos leves o diâmetro dos pneus varia entre 0,40-0,60 m , enquanto as dos caminhões variam entre **0,90-1,50 m** .

Dos **métodos baseados na velocidade do tráfego**, esta variável será analisada no intervalo entre **30 e 150 km/h** .

Além do:

- Tipo de Veículo.
- Pressão da inflação.
- Tipo de pneu

Embora os pneus diagonais sejam mais deformáveis e, portanto, gerem valores de coeficiente de resistência ao rolamento mais elevados, eles são usados principalmente em veículos leves. Os pneus de capa radial não serão, portanto, desconsiderados.

A partir do método **de acordo com a carga vertical que desce pelo pneu**, será analisado:

- Dependente da carga (extrapolando para valores até **6000 kg** por pneu)

B.4 Valores extremos do coeficiente de resistência ao rolamento para pontes rodoviárias nos métodos em função do tipo de superfície

Três métodos nesta classificação foram propostos na seção anterior. Tomando os valores definidos em **I.4.1**, para o primeiro método estabelecido os valores do coeficiente de resistência ao rolamento são:

Tabela 4: *Valores do coeficiente de resistência ao rodamento tendo em conta o tipo de superfície*

Superfície	coeficiente <i>f</i>	
	Bom estado	Mau estado
Concreto hidráulico	0,010	0,020
Concreto asfáltico	0,012	0,022

No segundo método¹² os valores para concreto hidráulico e asfalto não são diferenciados. A diferença surge no tipo de veículo :

Tabela 5: *Valores do coeficiente de resistência ao rodamento em função do tipo de veículo.*

Superfície	Tipo de Veículo	coeficiente <i>f</i>
Concreto hidráulico ou asfáltico	Automóveis e veículos leves	0,013
	Caminhões	0,010

No terceiro método¹³, apenas o material concreto hidráulico é de interesse e -nele- a pressão de inflação será variada na faixa de **28 - 36 psi**, já que as análises foram limitadas a **40** pressão *psi* :

Tabela 6: *Valores do coeficiente de resistência al rolamento em função da pressão de inflado*

Superfície	pressão da inflação [<i>psi</i>]	coeficiente <i>f</i> [%]
Concreto Hidráulico	28	0,86
	29	0,86
	30	0,85
	31	0,83
	32	0,81
	33	0,80
	34	0,80
	35	0,80
	36	0,79

Os valores obtidos no intervalo analisado são – eventualmente- risíveis.

¹¹ Vide 27 pág. 17-18

¹² Estes métodos foram presumivelmente obtidos em novas superfícies de betão hidráulico, pelo que os seus resultados podem ser extrapolados para outras superfícies, ver secção: I.5 (N. del A.)

¹³ Idem

A mesma coisa acontece quando a pressão de inflação se move entre **10 e 28 psi** ? Os resultados estão tabulados abaixo:

Tabela 7: Valores do coeficiente de resistência ao rolamento (f) em função da pressão de inflado.

Superfície	pressão da inflação [psi]	coeficiente f
Concreto Hidráulico	10	3,70
	11	3,30
	12	3,00
	13	2,70
	14	2,50
	15	2,20
	16	2,00
	17	1,90
	18	1,70
	19	1,50
	20	1,40
	25	0,90
	28	0,86

Como é claramente perceptível, os valores obtidos requerem análise.

Para o quarto método, o trabalho é realizado no diâmetro do pneu em uma superfície de concreto hidráulico. Os resultados obtidos são os seguintes:

Tabela 8: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento em função do diâmetro do pneumático.

Superfície	Diâmetro do pneu [m]	coeficiente f [%]
Concreto Hidráulico	0,50	1,90
	0,55	1,70
	0,60	1,60
	0,65	1,50
	0,70 – 0,80	1,40
	0,85-0,90	1,30
	0,95	1,20
	1,00	1,20
	1.10-1,50	1.11

O primeiro método – extraordinariamente simples – oferece um valor máximo para o coeficiente de rolamento em concreto asfáltico de **2,2 %**.

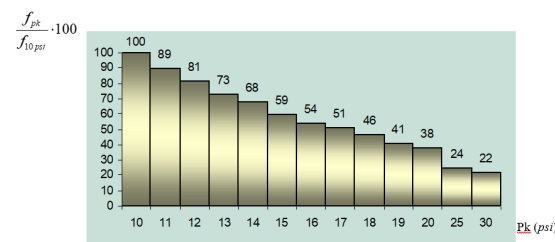
O segundo método tem a dificuldade de não diferenciar entre concreto hidráulico e concreto asfáltico e oferece o valor extremo de **1,3 %** para carros leves. A comparação entre os dois procedimentos sugere que o segundo foi obtido em pavimentos em boas condições.

O terceiro e quarto métodos foram obtidos em superfícies de betão hidráulico, o que não é uma limitação, uma vez que estes resultados podem ser transformados para outras superfícies de pavimento (dependendo das micro e macro texturas) conforme explicado em I.5 .

Por outro lado, a influência da pressão de inflação no coeficiente de resistência ao rolamento é evidente na faixa entre **10 e 28. psi** :

Ou seja, embora a pressão inflacionária varie quase três vezes (de **10 a 28 psi**) o coeficiente de resistência ao rolamento aumenta mais de quatro vezes.

O diâmetro do pneu não tem influência apreciável no valor do coeficiente de resistência ao rolamento, conforme mostrado abaixo:



O u seja,

figura 10: Variação relativa do coeficiente de rolamento em função da pressão do inflado

enquanto o diâmetro varia três vezes (de **0,50 a 1,50 m**), o coeficiente de resistência ao rolamento varia menos de 2 vezes.

Portanto, destes quatro métodos, a maior influência está na pressão inflacionária. Esta variável será utilizada para obter os valores de envoltória em diferentes tipos de pavimentos.

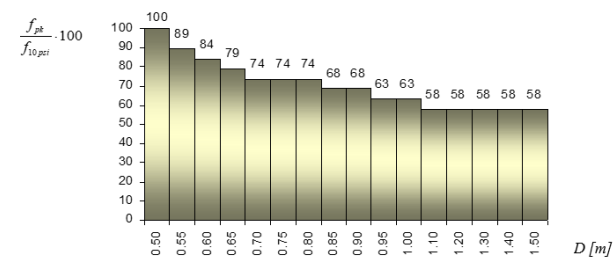
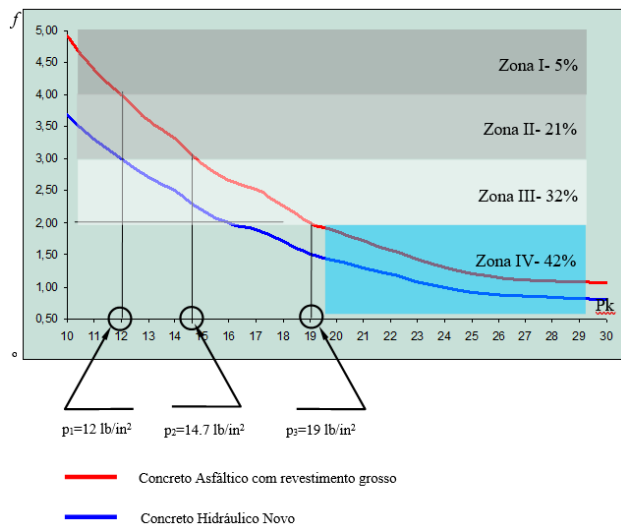


figura 10: Variação do coeficiente de resistência ao rolamento f para o intervalo entre 10 – 28 psi em diferentes superfícies.

O resultado da aplicação das transformações às diferentes texturas do pavimento é apresentado na tabela a seguir e no gráfico comparativo abaixo:

Tabela 9: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento para diferentes tipos de pavimentos em função da pressão de inflado.

Pk (psi)	Novo Concreto Hidráulico	Concreto asfáltico com revestimento grosso.
10	3,70	4,92
11	3,30	4,39
12	3,00	3,99
13	2,70	3,59
14	2,50	3,33
15	2,20	2,93
16	2h00	2,66
17	1,90	2,53
18	1,70	2,26
19	1,50	2,00
20	1,40	1,86
25	0,90	1,20
30	0,80	1,06



Como pode ser observado, os valores máximos que a força de resistência ao rolamento pode adotar correspondem a uma superfície de concreto asfáltico com revestimento espesso. Note-se que a situação crítica corresponde a uma pressão inflacionária de **10 psi**, quando o coeficiente f atinge o valor de **4,92 %**. Valores maiores ou iguais a **4 %** só são alcançados para este tipo de superfície e para pressões de inflação menores ou iguais a **12 psi**. Valores superiores a **3 %** são alcançados em todos os tipos de pavimentos representados, até um valor máximo de pressão de inflação, correspondente ao tipo de superfície de concreto

asfáltico com revestimento espesso de **14,7 psi**. Finalmente, acima de **19 psi**, os valores do coeficiente de resistência ao rolamento são inferiores a **2 %**.

Os valores do coeficiente de resistência ao rolamento foram divididos em quatro zonas:

- Zona I (supercrítica); $f \geq 4 \%$
- Zona II (crítica); $f (3 < f < 4)$
- Zona III (Subcrítica); $f (2 \leq f \leq 3)$
- Zona IV (valores insignificantes) $f < 2 \%$

Os valores obtidos nas zonas I e II são de interesse estrutural, pois estão muito próximos dos propostos por algumas normas [13] e [16], para representar forças longitudinais em pontes. Observe como mais de um quarto dos valores representados no gráfico (**26%**) são encontrados nessas áreas.

1.6.3 Valores extremos do coeficiente de resistência ao rolamento para pontes rodoviárias em métodos dependentes da velocidade.

Dois métodos para determinar o coeficiente de resistência ao rolamento foram apresentados em **II.3.2**:

Tabela 10: Métodos em função da velocidade e variáveis que analisam.

Método	Variáveis totais	Velocidade	Variáveis		
			pressão da inflação	Tipo de pneu	Tipo de Veículo
Método 1 (de Hahn)	2	x	x	-	-
Método 2	3	x	-	x	x

método **Hahn** porque avalia menos parâmetros. No entanto, note-se que este – ao contrário do método 2 – inclui a avaliação da pressão de inflação, parâmetro que, como visto na secção anterior, tem influência decisiva no comportamento do coeficiente de resistência ao rolamento.

métodos **Hahn** e o chamado método 2 (para veículos leves) nos intervalos de **28 - 36 psi**, os seguintes resultados são obtidos:

Tabela 11: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento (f) em função da pressão de inflado dos pneumáticos para um intervalo de **28-36 psi**

V[km/h]	Pressões de inflado [psi] (kg/cm ²)				
	28 (1,96)	30 (2,10)	32 (2,24)	34 (2,38)	36 (2,52)
30	0,72	0,65	0,59	0,54	0,49
40	0,74	0,67	0,61	0,56	0,51
50	0,77	0,70	0,64	0,58	0,54

60	0,81	0,74	0,68	0,62	0,58
70	0,87	0,79	0,73	0,67	0,62
80	0,93	0,86	0,79	0,73	0,68
90	1,02	0,94	0,87	0,81	0,75
100	1,12	1,03	0,96	0,90	0,84
110	1,24	1,15	1,07	1,00	0,94
120	1,38	1,28	1,20	1,12	1,06
130	1,55	1,44	1,35	1,27	1,20
140	1,73	1,62	1,52	1,43	1,35
150	1,94	1,82	1,71	1,61	1,53

Tabela 12: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento (f) em função do tipo de pneumático

V [km/h]	Tipos de pneus em veículos	
	Camadas radiais	Camadas distorcidas
30	1,36	1,71
40	1,37	1,72
cinquenta	1,37	1,74
60	1,37	1,76
70	1,38	1,78
80	1,39	1,81
90	1,39	1,84
100	1,40	1,88
110	1,41	1,92
120	1,42	1,96
130	1,43	2,01
140	1,44	2,06
150	1,45	2,12

Os valores mais elevados resultam da aplicação do método 2, que ficam ligeiramente acima de **2 %** apenas para o caso de pneus de capa diagonal quando a velocidade é igual ou superior a **130 km/h**.

métodos **de Hahn** e o chamado método 2 (para caminhões) na faixa de **90 –120 psi**, são obtidos os seguintes resultados:

Tabela 13: Coeficiente de resistência ao rodamento f [%] para diferentes pressões de inflado de pneumáticos de camiões, aplicando a equação de **Hahn**

V [km /h]	Pressões de inflado [psi] (kg/cm ²)			
	90 [6,3]	100 [7]	110 [7,7]	120 [8,4]
30	0,13	0,11	0,10	0,09
40	0,14	0,12	0,11	0,10
50	0,16	0,14	0,12	0,11
60	0,18	0,16	0,14	0,13
70	0,20	0,18	0,16	0,15
80	0,24	0,21	0,19	0,18
90	0,28	0,25	0,23	0,21
100	0,32	0,29	0,27	0,25
110	0,38	0,34	0,32	0,29
120	0,44	0,40	0,37	0,35
130	0,52	0,47	0,44	0,41
140	0,60	0,55	0,51	0,48
150	0,70	0,64	0,59	0,56

Tabela 14: Coeficiente de resistência ao rodamento f [%] para diferentes pneumáticos de camiões, aplicando o método 2

V[km/h]	Caminhões [90-120 psi]	
	Radial	Bias
30	0,62	0,74
40	0,64	0,77
cinquenta	0,66	0,81
60	0,68	0,86
70	0,71	0,92
80	0,75	0,99
90	0,79	1,06
100	0,83	1,15

Como esperado, os valores do coeficiente de atrito são agora totalmente desprezíveis. Os resultados são consistentes entre ambos os métodos e novamente ligeiramente superiores aos obtidos de acordo com o método **2**.

A mesma coisa acontece quando a pressão de inflação se move entre **10 e 28 psi** ?
pode ser utilizada a equação **de Hahn** , uma vez que o método **2** foi obtido para pressões de inflação constantes.

Os valores obtidos por **Hahn** , após aplicação de sua expressão na referida faixa de pressões inflacionárias, são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 15: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento f [%] para diferentes velocidades no rango de pressão de inflado entre 10-28 psi

V[km/h]	Pressão de inflado [psi] (kg/cm ²)				
	10 (0,7)	15 (1,05)	20 (1,40)	25 (1,75)	28 (1,96)
30	3,29	1,80	1,17	0,84	0,73
40	3,33	1,83	1,20	0,87	0,76
50	3,39	1,88	1,24	0,90	0,79
70	3,58	2,02	1,36	1,01	0,89
90	3,88	2,25	1,55	1,17	1,04
100	4,09	2,41	1,68	1,28	1,14
110	4,33	2,59	1,83	1,41	1,27
120	4,61	2,81	2,01	1,56	1,41
130	4,94	3,06	2,21	1,74	1,57
140	5,32	3,35	2,45	1,94	1,76
150	5,76	3,67	2,71	2,17	1,98

Esses resultados são posteriormente representados graficamente:

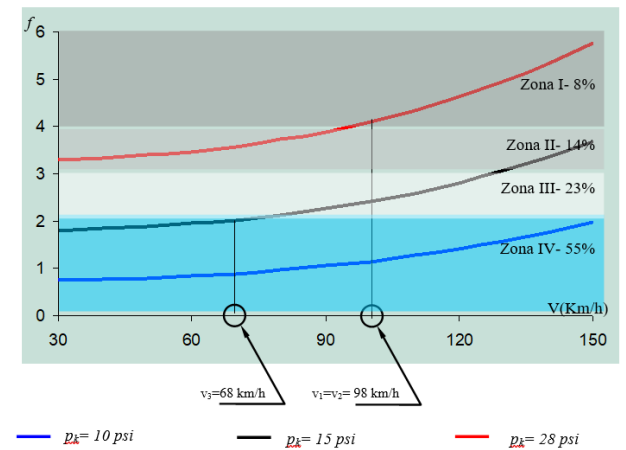


figura 11: Variação do coeficiente de resistência ao rodamento (f) para diferentes pressões de inflado em função da velocidade vertical

Como se pode verificar, os valores máximos que a força de resistência ao rolamento pode adotar correspondem às pressões de inflação mais baixas. Note-se que a situação crítica surge com uma pressão inflacionária de **10 psi** , quando o coeficiente f atinge o valor de **5,76 %**.
Valores maiores ou iguais a **4 %** só são alcançados para este tipo de superfície e para pressões de inflação menores ou iguais a **12 psi** . Valores acima de **3 %** são alcançados para pressões inflacionárias inferiores a **17,5 psi** . Para pressões de inflação superiores a este valor e velocidades inferiores a **98 km/h** , o coeficiente de resistência ao rolamento é sempre inferior a **2 %** . Quando a pressão de inflação for igual ou superior a **20 psi** , esta velocidade diminui para **68 km/h** .
Os valores obtidos nas zonas I e II são de interesse estrutural, pois estão muito próximos dos propostos por algumas normas [13] e [16], para representar forças longitudinais em pontes. Observe como cerca de um quarto dos valores representados no gráfico (**22 %**) são encontrados nessas áreas.

1.6.4 Valores extremos do coeficiente de resistência ao rolamento para pontes rodoviárias no método em função da carga suportada pelo pneu.

600 foram testadas. kg por pneu. O comportamento sob cargas mais elevadas deve ser extrapolado. Para realizar a extrapolação, inicialmente trabalhamos com a menor pressão de inflação testada no experimento (**2 kg/cm²** , em torno de **28 psi**) e foram estudados os seguintes modelos:

Tabela 16: Funciones de extrapolação nos métodos em função da carga que desce por o neumático para veículos ligeiros

ao modelo		determinação
Linear	$f = 1 \cdot 10^{-5} \cdot p_k + 0.0145$	0,96
Potencial	$f = 6 \cdot 10^{-3} \cdot p_k^{0.1877}$	0,99
Logarítmico	$f = 33 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(p_k) - 0.0013$	0,99

Os modelos que melhor representam os pares correspondentes à referida pressão inflacionária são o logarítmico e o potencial. Os resultados extrapolados com estes modelos até **1000 kg** mostram os seguintes resultados:

Tabela 17: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento [%] obtidos para os diferentes modelos de extrapolação segundo a carga que desce por o neumático para veículos ligeiros

Peso descendo pelo pneu [kg]	Valores de f			
	Experimental	Modelo linear	Modelo Potencial	Modelo logarítmico

200	1,62	1,65	1,62	1,62
300	1,78	1,75	1,75	1,75
400	1,85	1,85	1,85	1,85
500	1,93	1,95	1,93	1,92
600	-	2,05	1,99	1,98
625	-	2,08	2,01	1,99
630	-	2,08	2,01	2,00
650	-	2,10	2,02	2,01
700	-	2,15	2,05	2,03
800	-	2,25	2,10	2,08
1000	-	2,45	2,19	2,15

Cargas de pneus inferiores a **630 kg** dão origem a valores do coeficiente de resistência ao rolamento inferiores a **2 %**.

Posteriormente, a análise foi realizada para pressões inflacionárias de até **6 kg/cm² (90 psi)**, pressão dos pneus para veículos pesados, e foram estudados os seguintes modelos:

Tabela 18: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento f [%] obtidos para os diferentes modelos de extrapolação segundo a carga que desce por o pneumático para veículos pesados

Identificação do modelo	Equação	Coeficiente de determinação
Linear	$f = 5 \cdot 10^{-5} \cdot p_k + 0.0079$	0,99
Potencial	$f = 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot p_k^{0.1575}$	0,98
Logarítmico	$f = 15 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(p_k) - 0.0009$	0,98

Os modelos que melhor representam os pares correspondentes à referida pressão inflacionária são o logarítmico e o potencial. Os resultados extrapolados com estes modelos até **6000 kg** mostram os seguintes resultados:

Tabela 19: Valores do coeficiente de resistência ao rodamento [%] obtidos para os diferentes modelos de extrapolação segundo a carga que desce por o pneumático para veículos ligeiros

Peso	Valores de f
------	----------------

descenda o pelo pneu [kg]	Experimental	Modelo linear	Modelo Potencial	Modelo logarítmico
200	0,88	0,89	0,88	0,88
300	0,93	0,94	0,93	0,95
400	0,97	0,99	0,98	0,99
500	1,02	1,04	1,01	1,02
1000	-	1,29	1,13	1,13
2000	-	1,79	1,26	1,23
2420	-	2,00	1,30	1,26
3.000		2,29	1,34	1,29
4000		2,79	1,40	1,33
5.000		3,29	1,45	1,37
6.000		3,79	1,50	1,39

Tabela 20: Força de resistência ao rodamento para o convoy **N-30** ate **1000 m** de longitude tendo em conta o tipo de superfície e da carga que desce por o pneumático

l [m]	Eixos N-30		Força de resistência ao rolamento [kN]	
	traseira	frente	tipo de superfície	De acordo com a carga que desce pelo pneu Modelo Potencial
0	0	0	0,00	0,00
24,99	4	1	11,88	8,00
25	4	1	11,88	8,00
49,99	6	2	18,48	12,41
50	6	2	18,48	12,41
100	12	5	27,84	25,62
200	22	11	52,80	48,44
300	34	17	81,60	74,87
400	46	22	109,44	100,49
450	51	25	121,92	111,90
500	58	28	138,24	126,91
550	62	31	148,80	136,52
600	68	34	163,20	149,74
650	74	36	176,64	162,14
700	80	39	191,04	175,36
750	85	42	203,52	186,77
800	90	45	216,00	198,18

850	96	48	230,40	211,39
900	102	51	244,80	224,60
1000	114	56	272,64	250,22

V. APLICAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados deste capítulo são aplicados ao comboio **N-30**, composto por veículos pesados (caminhões), o que implica que serão considerados os seguintes parâmetros.

- Pressão de inflação (**90 psi**)
- Diâmetro do pneu (**1m**)
- Taxas de pneus por **6.000 kg** para eixos traseiros e **3000 kg** para eixos dianteiros
- Distância entre eixos e distância entre veículos (**10 m**)
- Velocidade de circulação (**30-100 km/h**)
- Tipos de superfícies de pavimento (concreto asfáltico com revestimento espesso)

Os valores do coeficiente de resistência ao rolamento em função da velocidade e para caminhões são inferiores a **1%**, portanto esta variável não será levada em consideração no projeto.

Para obter expressões que relacionem o coeficiente de resistência ao rolamento com o comprimento carregado, será analisado um intervalo entre **0-1000m** comprimento carregado.

O fato de se considerar um tipo de pavimento: concreto asfáltico com revestimento espesso, implica que após análise dos **4** métodos propostos, a decisão de projeto é considerar o coeficiente de resistência ao rolamento igual a **1,60 %** para o diâmetro dos pneus de caminhão daquele tipo de superfície.

Ao considerar a carga vertical que desce pelo pneu, serão consideradas as seguintes porcentagens:

$f = 1,5 \%$ para carga de **6.000 kg**

$f = 1,34 \%$ para carga **3000 kg**

e os modelos resultantes serão:

$$f = 1.60 \cdot CV \quad (1)$$

$$f = 1.5 \cdot CV_{\text{EIXO DIANTEIRO}} + 1.34 \cdot CV_{\text{EIXO TRASEIRO}} \quad (2)$$

(1) segundo o tipo de superfície

(2) segundo a carga que deixo pelo neumático onde:

FX : Força de

resistência ao rolamento

CV ; $EIXO DIANTEIRO$ CV ; $EIXO TRASEIRO$ CV : Carga móvel total, para eixos dianteiros e para eixos traseiros; respectivamente, no comprimento carregado.

O problema é obter a carga móvel em função do comprimento da carga. A referida carga e os valores resultantes da aplicação dos modelos anteriores são apresentados na tabela a seguir:

Como a tendência da distribuição é claramente linear, foram obtidas duas expressões que relacionam a força de resistência ao rolamento (F_x) e o comprimento carregado para o **N-30**.

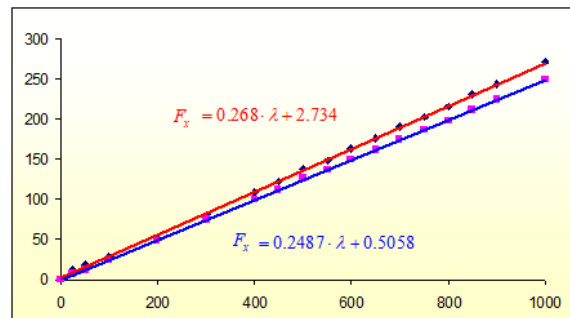


figura 12 funções lineares da influência da resistência ao rolamento de **N – 30** até **1000 m** considerando o tipo de superfície e carga que desce do neumático

— Em função do tipo de superfície

— Em função da carga sobre o neumático

Tabela 21 Valores de resistência ao rolamento para o **N-30** mostrando a força real, la obtida pelos modelos analisados e seus correspondentes resíduos.

λ [m]	F _x segundo tipo de superfície			F _x segundo carga que desce pelo neumático			Resíduos
	Valores obtidos	$F_x = 0.27 \cdot \lambda + 0.49$	Resíduos	Valores obtidos	$F_x = 0.25 \cdot \lambda + 0.51$		
0,00	0,00	2,73	-2,73	0,00	0,51	-0,51	
24,99	8,64	9,43	-0,79	8,00	6,72	1,28	
25,00	8,64	9,43	-0,79	8,00	6,72	1,28	
49,99	13,44	16,13	-2,69	12,41	12,94	-0,53	
50,00	13,44	16,13	-2,69	12,41	12,94	-0,53	
100,00	27,84	29,53	-1,69	25,62	25,38	0,24	
200,00	52,80	56,33	-3,53	48,44	50,25	-1,80	
300,00	81,60	83,13	-1,53	74,87	75,12	-0,25	
400,00	109,44	109,93	-0,49	100,49	99,99	0,50	
450,00	121,92	123,33	-1,41	111,90	112,42	-0,52	
500,00	138,24	136,73	1,51	126,91	124,86	2,06	
550,00	148,80	150,13	-1,33	136,52	137,29	-0,77	
600,00	163,20	163,53	-0,33	149,74	149,73	0,01	

650,00	176,64	176,93	-0,29	162,14	162,16	-0,02
700,00	191,04	190,33	0,71	175,36	174,60	0,76
750,00	203,52	203,73	-0,21	186,77	187,03	-0,26
800,00	216,00	217,13	-1,13	198,18	199,47	-1,29
850,00	230,40	230,53	-0,13	211,39	211,90	-0,51
900,00	244,80	243,93	0,87	224,60	224,34	0,27
1000,00	272,64	270,73	1,91	250,22	249,21	1,02

VI. CONCLUSÕES

- Os extremos do coeficiente de resistência ao rolamento para pontes rodoviárias, nos métodos dependentes do tipo de superfície, atingem os seguintes valores:
 - ao considerar *apenas* o tipo de superfície - **2,20 %** - para concreto asfáltico em mau estado e **1,20 %** se estiver em bom estado.
 - para veículos leves **-1,14 % (0,86*1,33)** - para concreto asfáltico com revestimento espesso e para pressão de **28 psi**
 - ao considerar o diâmetro **-2,52 % (1,90*1,33)** - para o diâmetro de 50 cm. Para diâmetros de pneus de caminhão **1,60 % (1,20*1,33)** em ambos os casos para concreto asfáltico com revestimento espesso
 - apenas para pressões inflacionárias inferiores ou iguais a **12 psi** e para a superfície para concreto asfáltico com revestimento espesso são atingidos valores maiores ou iguais a **4 %**.
 - Acima de **19 psi**, os valores do coeficiente de resistência ao rolamento são inferiores a **2 %**.
- O valor extremo do coeficiente de resistência ao rolamento para pontes rodoviárias nos métodos dependentes da velocidade é o seguinte:
 - para veículos leves atinge **2,12 %** em pneus diagonais a **150 km/h**
 - para caminhões atinge **1,15 %** em pneus diagonais a **100 km/h**
 - apenas para pressões inflacionárias inferiores ou iguais a **12,5 psi** e quando simultaneamente a velocidade for superior a **98** São atingidos valores de **km/h maiores ou iguais a 4 %**
 - Para pressões inflacionárias superiores a **17,5 psi** e velocidades inferiores a **98 km/h**, o coeficiente de resistência ao rolamento é sempre inferior a **2%**
 - Para pressões inflacionárias superiores a **20 psi** e velocidades inferiores a **68 km/h**, o coeficiente

de resistência ao rolamento é sempre inferior a **2 %**

- No caso do método baseado na carga que desce pelo pneu, o potencial foi tomado como modelo de referência (por ter comportamento médio entre linear e logarítmico). Nele atingem valores de **2,19 %** para veículos leves (cargas por pneu de até **1000 kg** e pressão de inflação de **28 psi**) e **1,50 %** para caminhões (cargas de pneus até **6.000 kg** e pressão de inflação de **90 psi**). Acima de **3 %** somente quando as cargas dos pneus forem iguais ou superiores a **5,5 t**, seguindo uma extrapolação potencial. Cargas nos pneus inferiores a **620 kg** provocam valores de coeficiente de resistência ao rolamento inferiores a **2 %** para veículos leves. Nos caminhões esse valor fica sempre abaixo de **2 %** na faixa analisada.
- N-30** como carga móvel de projeto, são produzidos para o caso de uma superfície típica: concreto asfáltico com revestimento espesso. Seguindo uma lei linear que atinge o valor de **270 KN** para um comprimento carregado de **1000 eu**

BIBLIOGRAFIA

- QUALIDADE DE LAMINAÇÃO (on-line)
< <http://www.aepo.es/ausc/publ/calidad.pdf> >
- CASANELLA LEYVA Raúl e José Luis Arenas
Fonte: *Força de Frenagem e Solicitações em Colunas*, 2 Generalizações ao Código das Pontes Cubanas. Universidade de Holguín. 1998
- CAPÍTULO 2 Introdução à Tribologia (online)
< <http://www.roadhouse.com/manual/cap2.PDF> >
- CRESPO DEL RIO, Ramon: *O Índice Internacional de Fricção (IFI). Obtenção e Aplicações (on-line)* < <http://www.aepo.es/ausc/publ/ifi.pdf> >
- CRESPO DO RIO, Ramon; Engenheiros Consultores AEPO: *Sistemas de gestão de empresas rodoviárias (online)*
< http://www.aepo.com.es/aepo-ld/ausc/publ/j_his_p_anoamericanas.pdf >
- CARGAS DE DESIGN (online) < nas bases automatizadas da Universidade de Holguín > (consulta em 23 de abril de 2003)
- DE SOLMINIHAC, Hernán: *Índice Internacional de Fricção (em linha)* < http://www.revistabit.cl/pdf/bit22_art10.pdf >
- DE SOLMINIHAC T, Hernán ; ECHAVEGUREN N, Tomás; et alles: *Fricção superficial em pavimentos: correlação entre vários equipamentos de medição (online)* <http://www.revistabit.cl/pdf/30-35.pdf> > _ _
- DÍAZ, Eduardo E.: *Engenharia de Tráfego*, Volume I, Segunda Parte. Editora ISPJAE, 1990
- EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE FRICÇÃO TRANSVERSAL (online)** < <http://www.cedex.es/> >
- EQUIPAMENTO DE AUSCULTAÇÃO (online)** < <http://www.cedex.es/cec/documenti/survey.htm> >
- EQUIPES LBC (on-line)

- < http://www.laboratoriobalear.com/memoriaparte2_.pdf >
12. TESTE DE APERTO (on-line)
<http://www.aepo.com.es/aepo-old/ausc/equip/f_gtest.pdf>
 13. INSTRUÇÃO SOBRE AÇÕES A SEREM CONSIDERADAS NO PROJETO PONTE RODOVIÁRIA (IAP)
<<http://www.carreteros.org/estructuras/iap98/apartados/om.htm>>
 14. INTRODUÇÃO À AUSCULTA FIRME (em linha)
< <http://www.aepo.es/ausc/publ/auscultacion.pdf> >
 15. LUCERO CAMPOS, Robinson; WAHR DANIEL, Carlos; e tudo mais *Estudo de atrito do pavimento (AVANCE)* (online) < http://www.udec.cl/~provial/trabajos_pdf/ >
 16. MERRITT, Frederick: Manual padrão para engenheiros civis . Edição: McGraw – Hill Books Company. 1984
 17. MERY G, José Pedro: *Pêndulo britânico e resistência ao escorregamento em pavimentos: o tradicional não sai de moda* (online) < <http://www.revistabit.cl/pdf/28-31.pdf> >
 18. NC-53-125:84. . *Especificações do projeto e métodos de cálculo. Pontes e Esgotos* . CEN, 1984
 19. NEUBERT, Timothy W; Yager, Thomas J; et alles : *Requisitos para testes e equipamentos de pavimento de fricção* (online)
http://www.outreach.psu.edu/C&I/Airport/pres/c5_neubert.pdf
 20. ROCO, Victor; FUENTES, Cláudio; e outros *Avaliação da resistência à derrapagem em pavimentos chilenos* (online)
<http://www.udec.cl/~provial/trabajos_pdf /VictorRocoResistenciaDeslizamiento.pdf>
 21. SERVIÇOS E EQUIPAMENTOS DE AUSCULTAÇÃO (online)
< <http://www.aepo.com/aepo-old/ausc/ejem/pre.pdf> >
 22. SITE DE FÍSICA DINÂMICA (online)
< <http://scsx01.sc.ehu.es/sbweb/physics/default.htm> >
(Consulta em 9 de maio de 2003)
 23. SZCZCPANIAK, Cezary; ARAGÃO, Rigoberto: *A Teoria do Automóvel* . Editora Pessoas e Educação. Havana, terceira reimpressão, 1993
 24. TAYLOR Gustavo e Ernesto Valdés: *Pontes* , Volume I. Editora Gente e Educação,
 25. TAYLOR Gustavo e Ernesto Valdes: *Pontes* , Volume II, Parte Dois. Editora Pessoas e Educação,
 26. VELÁZQUEZ, Rafael: *Modelagem da força de frenagem em superestruturas de pontes rodoviárias*. Trabalho de diploma. Universidade de Holguín. 2003
 27. [WONG, J. Y: Teoria dos Veículos Terrestres . John Wiley & filhos, inc. –3ª edição . Estados Unidos da América, 2001.](#)
 28. METODOLOGIA DE PESQUISA (suporte digital). Bases de informação do Departamento de Engenharia Civil da UHO.
 29. GARCÍA, Rafael: *Dicionário Técnico Inglês-Espanhol*. Edições Revolucionárias. Havana, 1986
 30. MAYZ ACOSTA, Edgar: *Conhecimento Básico Automotivo*
<<http://www.automotriz.net/tecnica/knownedges-basicos-intro.html> >
 31. FUNDORA, Gonzalo: *Tema III. Características superficiais dos pavimentos* (online)
<em bases automatizadas da Universidade de Holguín>
 32. CONCARI, Sonia Beatriz, POZZO, Roberto Luis; et alles: *Um estudo sobre atrito em livros de fisica de nível universitário*.
<em bases automatizadas da Universidade de Holguín>
 33. CÓDIGO DE PROJETO DE PONTE ESTRADA DE ONTÁRIO. 3º – Edição. Vol. 1. <em bases automatizadas da Universidade de Holguín>