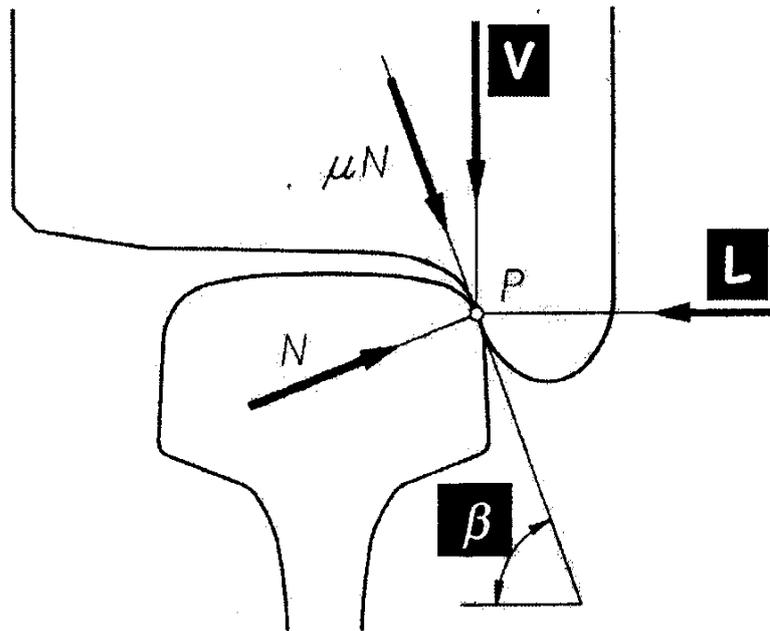


	Concreto Protendido Notas de aula	Ponte ferroviária Força lateral	Prof. Eduardo C. S. Thomaz	pág. 1/11
---	---	------------------------------------	-------------------------------	-----------

## Relação limite entre a força lateral ( L ) e a força vertical ( V ) na roda do trem.

*Figuras do livro : Tratado de Estradas de Ferro Vol. II – Eng. José Eduardo S. Castello Branco e Eng. Ronaldo Ferreira - Edição 2002 – Rio de Janeiro*

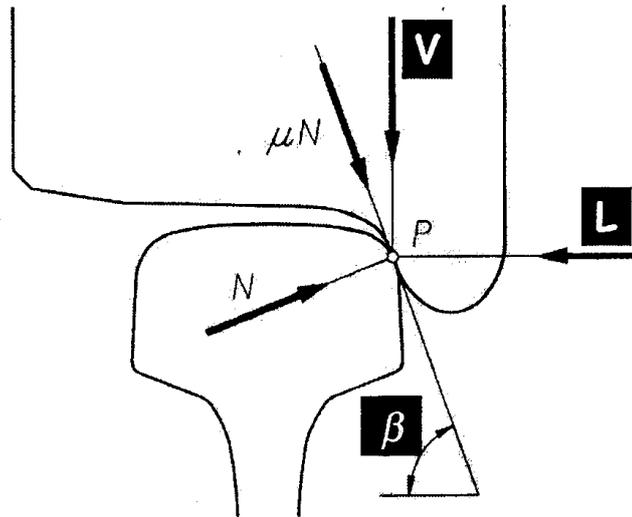


$$(L/V)_{cr} = \frac{Tg \beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg \beta}$$

*Fórmula de Nadal - 1896*

	Concreto Protendido Notas de aula	Ponte ferroviária Força lateral	Prof. Eduardo C. S. Thomaz	pág. 2/11
---	--------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------	-----------

## Dedução da fórmula de Nadal



$$V \times \text{sen} \beta - L \times \text{cos} \beta = \mu \times N \quad (\text{no plano da escalada})$$

$\mu$  = coeficiente de atrito aço  $\times$  aço = 0,57 ( *deslizamento sem lubrificação* )

$$V \times \text{cos} \beta + L \times \text{sen} \beta = N \quad (\text{no plano normal})$$

*eliminando N*

$$V \times \text{sen} \beta - L \times \text{cos} \beta = \mu \times (V \times \text{cos} \beta + L \times \text{sen} \beta)$$

$$V \times (\text{sen} \beta - \mu \times \text{cos} \beta) = L \times (\text{cos} \beta + \mu \times \text{sen} \beta)$$

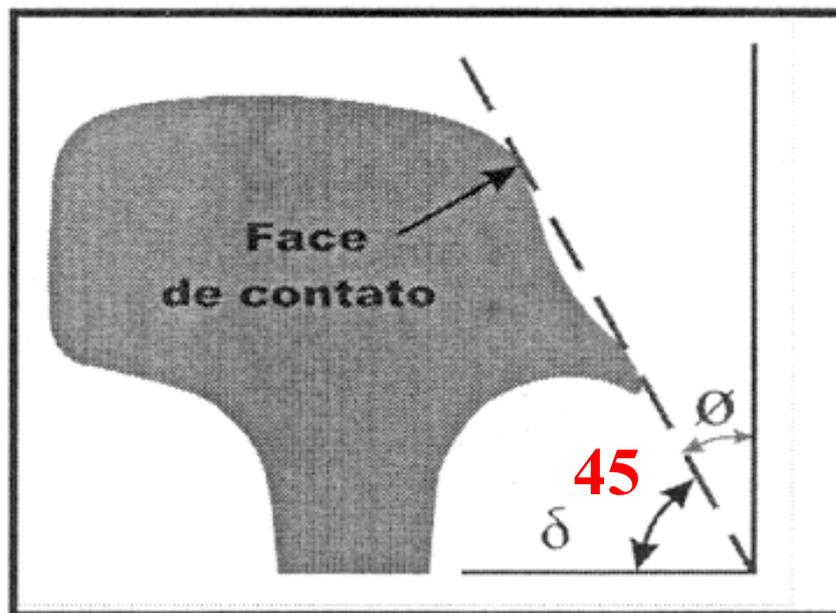
$$\frac{L}{V} = \frac{(\text{sen} \beta - \mu \times \text{cos} \beta)}{(\text{cos} \beta + \mu \times \text{sen} \beta)} = \frac{\text{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \times \text{tg} \beta}$$

Se  $\beta = 70$  graus ( trilho novo)  $\mu = 0,1$  ( com boa lubrificação) ;  
 $L/V = 2,0$       **Difícil descarrilhar**

*Mas ...*

	Concreto Protendido Notas de aula	Ponte ferroviária Força lateral	Prof.. Eduardo C. S. Thomaz	pág. 3/11
---	---	------------------------------------	--------------------------------	-----------

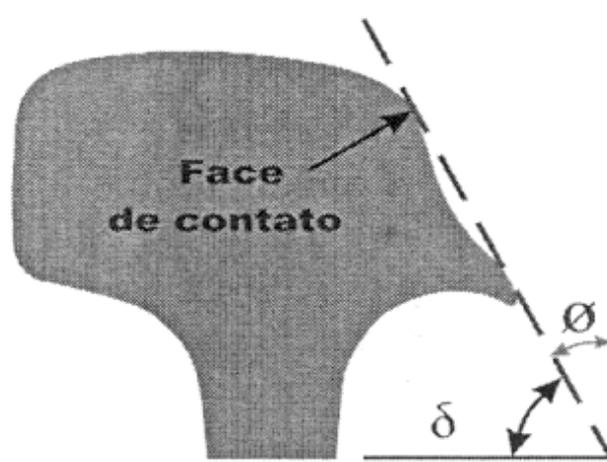
*Mas ...*



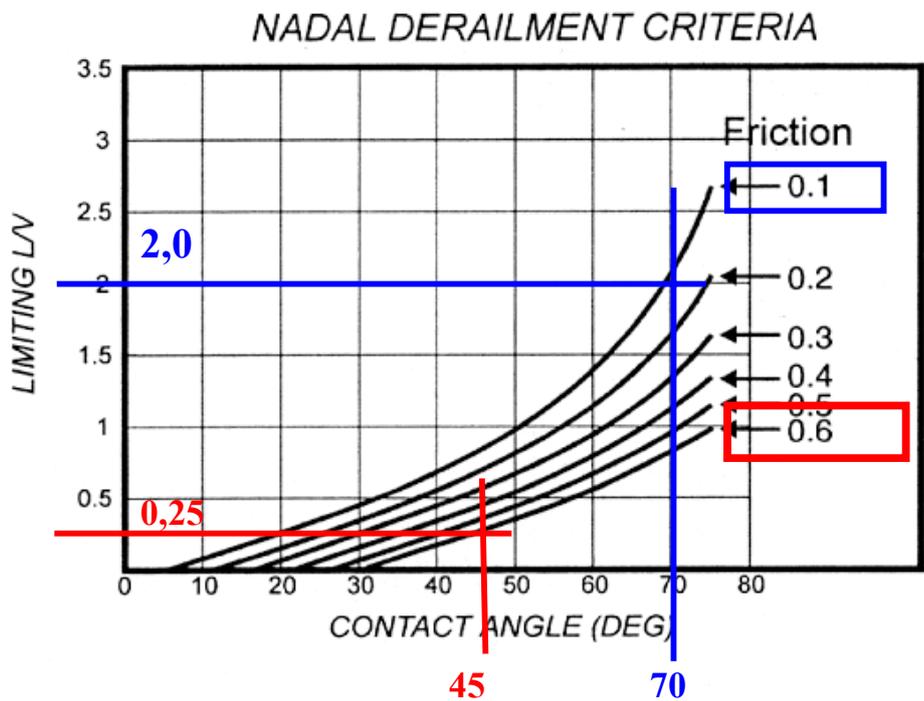
**Figura 20: Critério de Nadal para trilho com desgaste**

Se  $\beta = 45$  graus ( trilho com desgaste ) e  $\mu = 0,57$  ( sem lubrificação e com areia )

$L/V = 0,27$  **Fácil descarrilhar**



**Figura 20: Critério de Nadal para trilho com desgaste**



**Figura 21: Critério de Nadal para trilho com desgaste**

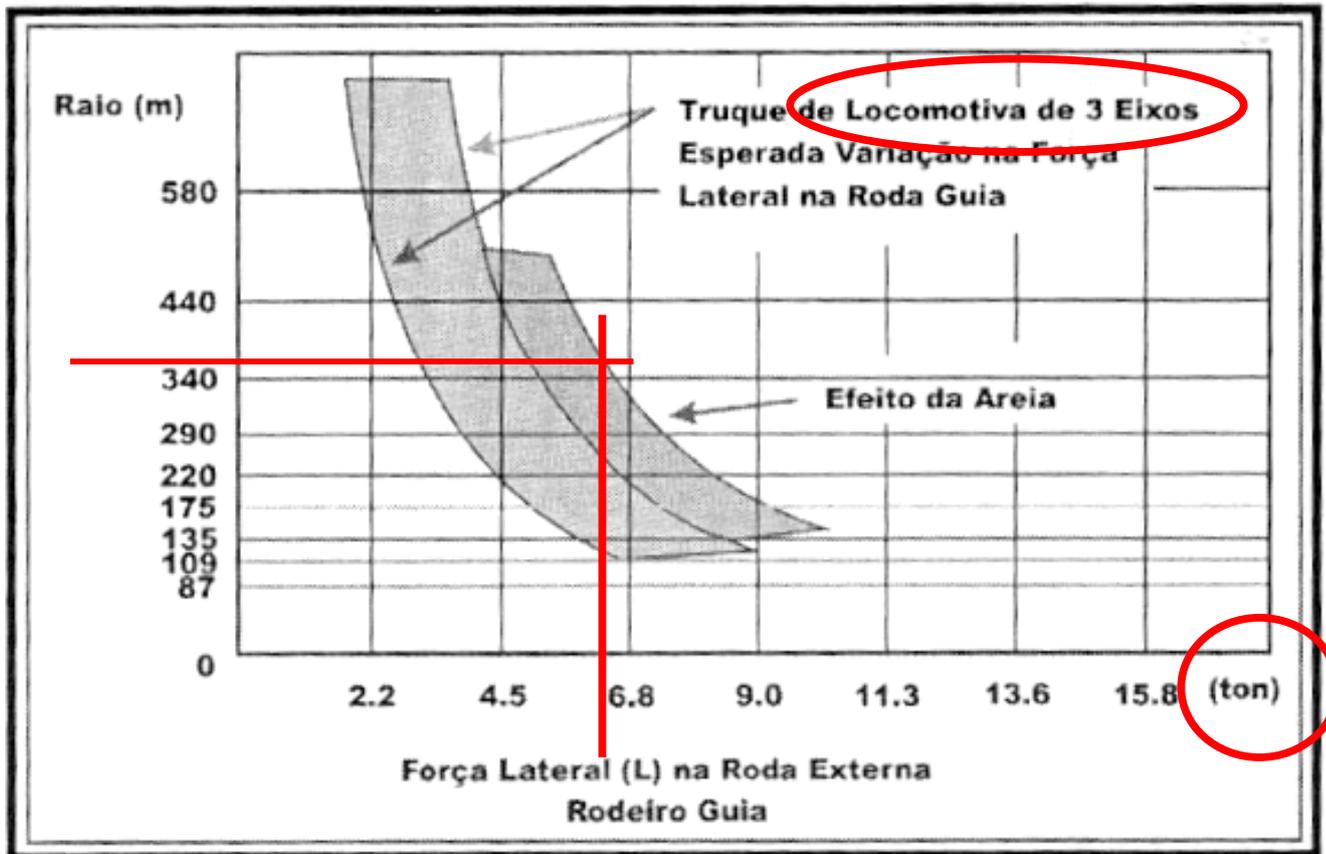


Figura 22: Influência da Areia em Curva

	Concreto Protendido Notas de aula	Ponte ferroviária Força lateral	Prof. Eduardo C. S. Thomaz	pág. 6/11
---	--------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------	-----------

## Testes realizados em Minas Gerais

Medições da relação L/V, feitas pelo IPT e pela SR-2/RFSA – Belo Horizonte em 1992

Trem com 2 locomotivas de 2000HP e 79 vagões vazios ( 18 GFD e 61 TCD).

A velocidade era de 50 km/h em uma longa rampa descendente de 1,2% . O trecho era em curva de 343m de raio e com desenvolvimento de 1,0 km

Trilhos TR57, dormentes de madeira, fixação rígida, lastro padrão e estado geral ruim, no trecho do ensaio. Eram 316 eixos.

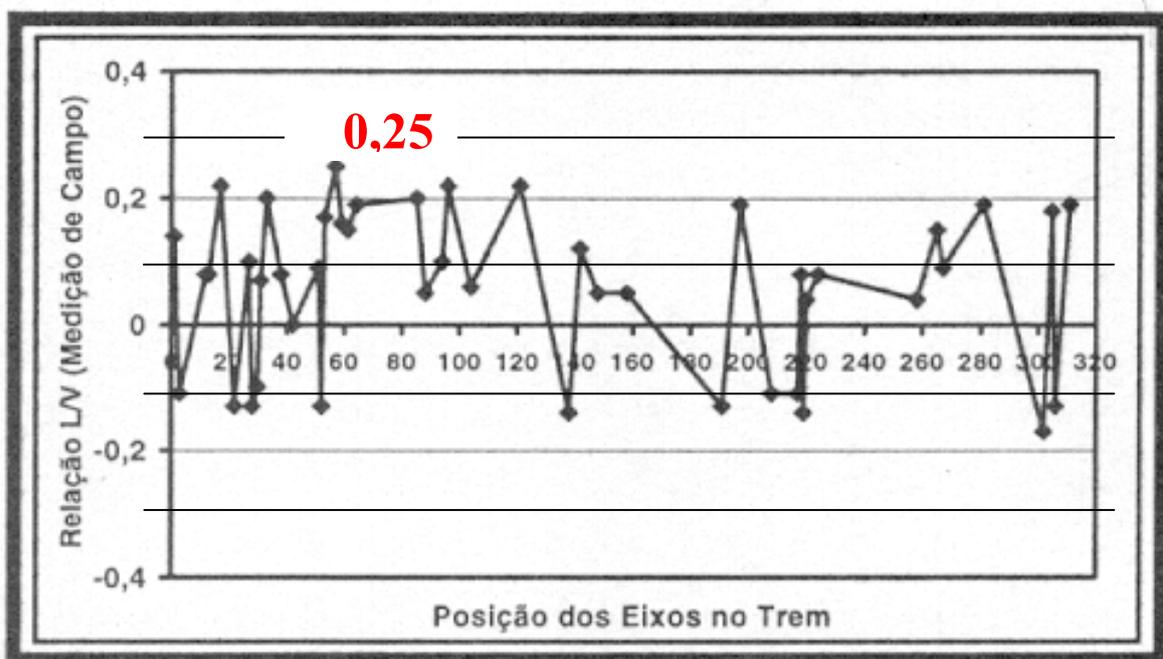


Figura 17: Relação L/V em experiências no Brasil

- Nos eixos não assinalados o esforço transversal era menor que 10 % da carga vertical
- A relação L/V máxima medida foi 0,25

	Concreto Protendido Notas de aula	Ponte ferroviária Força lateral	Prof.. Eduardo C. S. Thomaz	pág. 7/11
---	---	------------------------------------	--------------------------------	-----------

## Testes realizados em Minas Gerais

Medições da relação  $L/V$ , feitas pelo IPT e pela SR-2/RFSA – Belo Horizonte em 1992

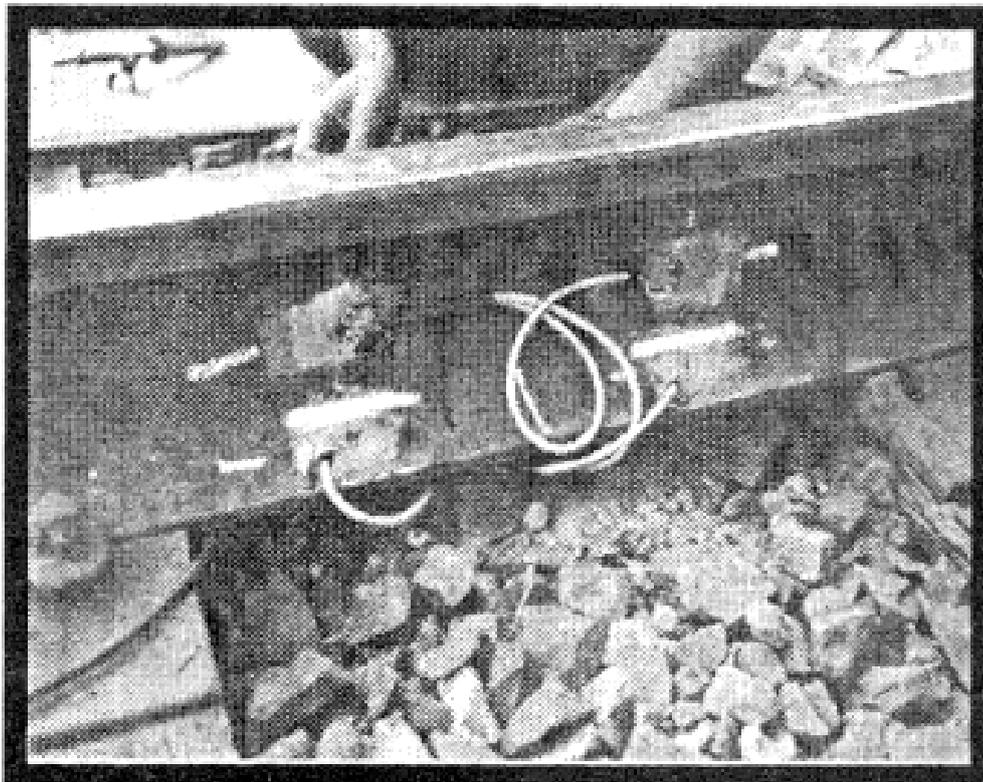


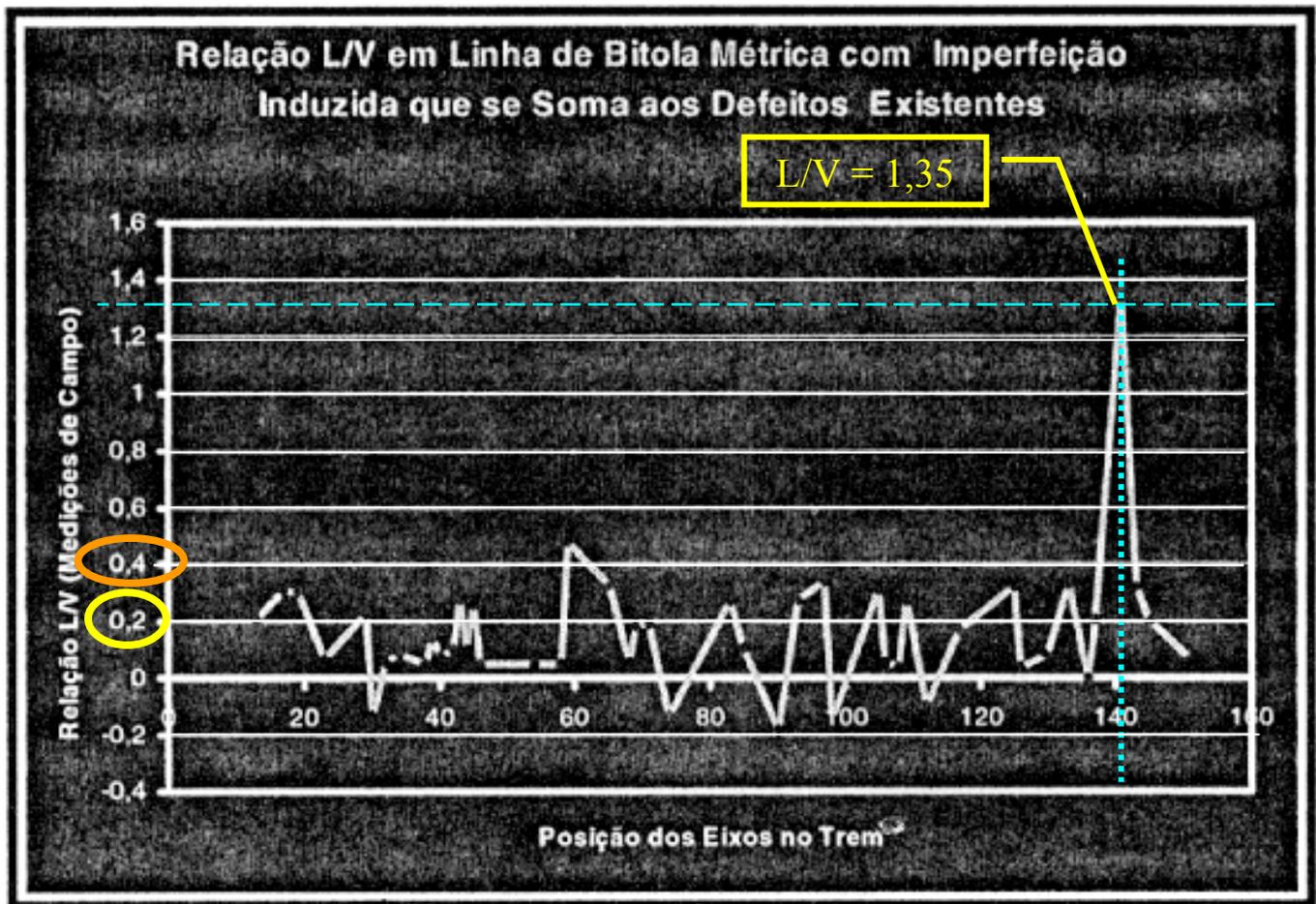
Figura 18: Células de carga

- Hoje se usa Fibra Ótica para medir as deformações dos trilhos e medir as cargas nas rodas.
- A monitoração pode ser permanente.

	Concreto Protendido Notas de aula	Ponte ferroviária Força lateral	Prof. Eduardo C. S. Thomaz	pág. 8/11
---	--------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------	-----------

## Testes realizados em Minas Gerais

### Imperfeições nos trilhos

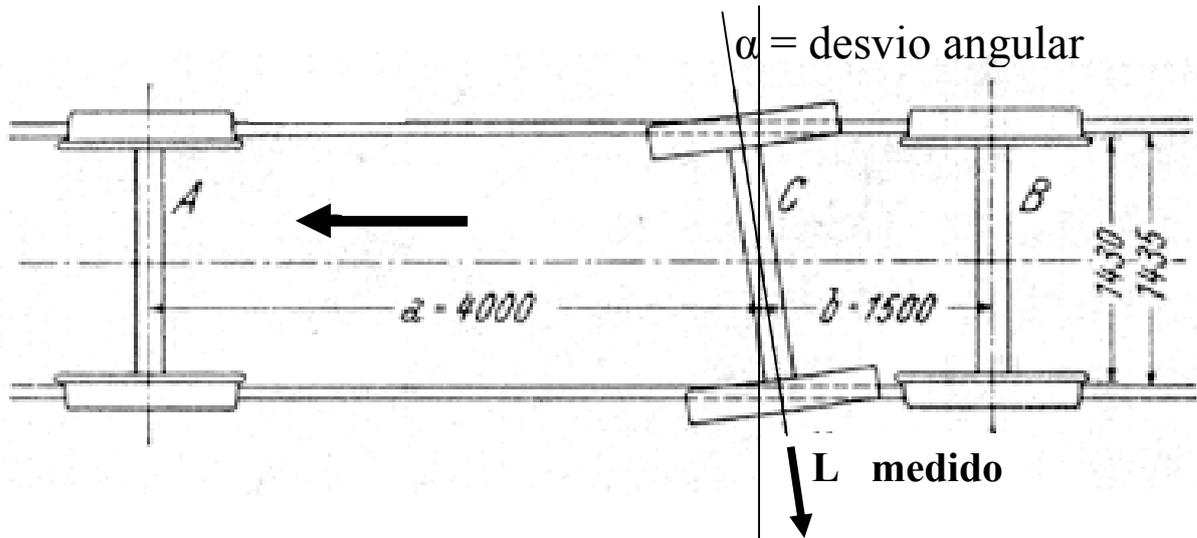


**Figura 19: Relação L/V com imperfeição induzida**

- Foi criada intencionalmente uma redução da bitola em 15mm, induzindo esforços não rotineiros.
- Com imperfeições nos trilhos a força transversal pode ser de 40% da carga vertical. ( $L/V = 0,40$ )
- Nos eixos não assinalados o esforço transversal era menor que 10% da carga vertical

## Testes L/V realizados na Alemanha

Veículo para teste da força transversal em eixos esconsos.

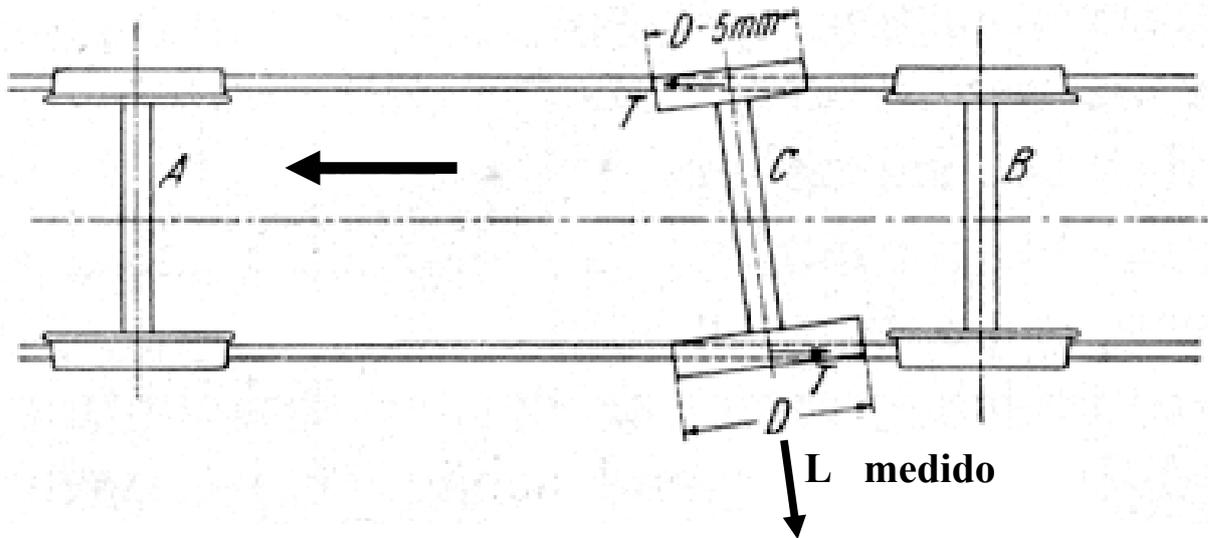


## Eixo esconso com Duas rodas iguais

Desvio angular $\alpha$ do eixo esconso	Carga vertical $V$ no eixo esconso											
	$V=6t$		$V=8t$		$V=10t$		$V=12t$		$V=14t$		$V=16t$	
	L (kg)	L/V	L(kg)	L/V	L(kg)	L/V	L(kg)	L/V	L(kg)	L/V	L(kg)	L/V
3'	200	0,03	400	0,05	600	0,06	850	0,07	1100	0,08	1450	0,09
9'	750	0,13	950	0,12	1200	0,12	1500	0,13	1750	0,13	2100	0,13
15'	1120	0,19	1400	0,18	1700	0,17	1850	0,16	2200	0,16	2650	0,17
30'	1350	0,23	1700	0,22	2100	0,21	2400	0,20	2700	0,19	3000	0,19
1°	1400	0,23	1850	0,23	2250	0,23	2600	0,22	2900	0,22	3250	0,20
2°	1400	<b>0,23</b>	1850	<b>0,23</b>	2250	<b>0,23</b>	2600	<b>0,22</b>	2900	<b>0,22</b>	3250	<b>0,20</b>

## Testes L/V realizados na Alemanha

Veículo para teste da força transversal em eixos esconsos.

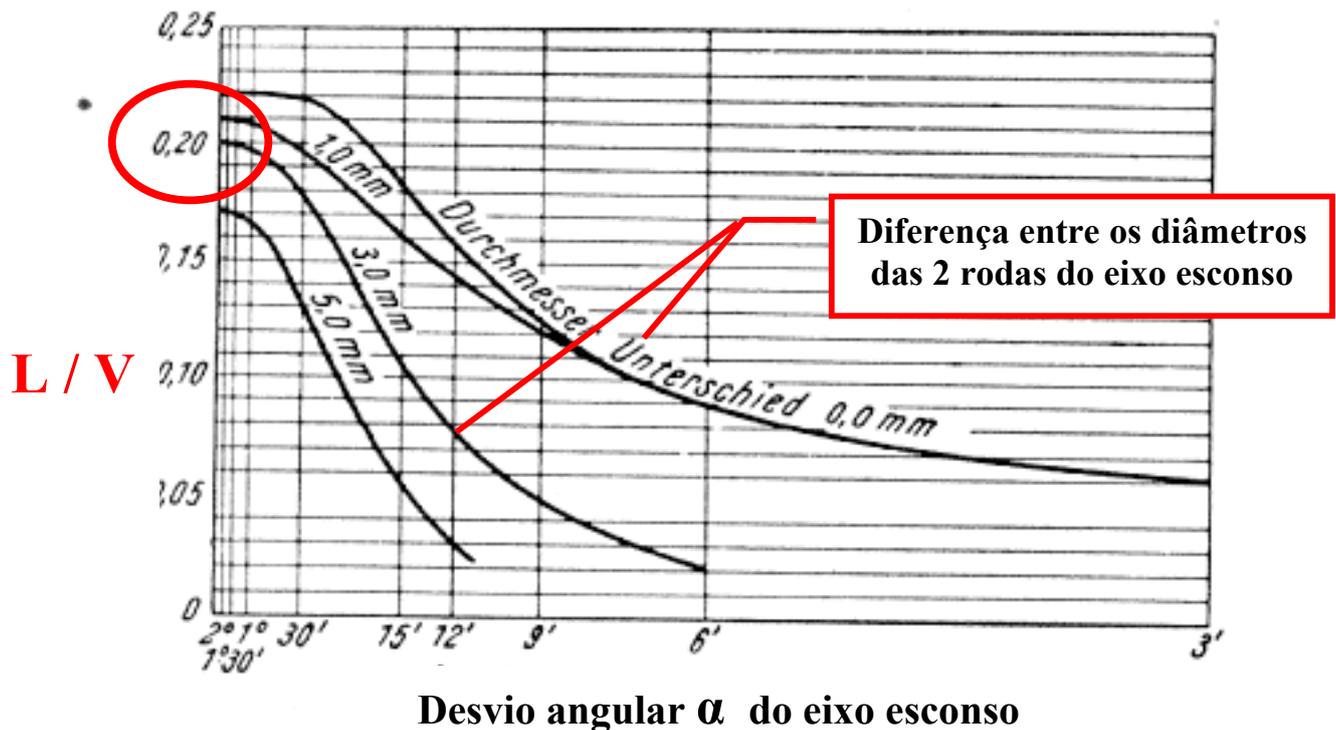


Eixo esconso com Duas rodas de diâmetros diferentes

Desvio angular $\alpha$ do eixo esconso	Carga vertical <b>V</b> no eixo esconso											
	<b>V= 6t</b>		<b>V= 8t</b>		<b>V=10 t</b>		<b>V=12t</b>		<b>V=14t</b>		<b>V=16t</b>	
	L (kg)	L/V	L(kg)	L/V	L(kg)	L/V	L(kg)	L/V	L(kg)	L/V	L(kg)	L/V
3'												
9'												
15'			200	0,03	400	0,04	700	0,06	1000	0,07	1300	0,08
30'	700	0,12	1000	0,13	1300	0,13	1600	0,14	1800	0,13	2100	0,13
1°	1100	0,18	1400	0,18	1650	0,17	1900	0,16	2150	0,16	2500	0,16
2°	1100	<b>0,18</b>	1400	<b>0,18</b>	1650	<b>0,17</b>	1900	<b>0,16</b>	2150	<b>0,16</b>	2500	<b>0,16</b>

	Concreto Protendido Notas de aula	Ponte ferroviária Força lateral	Prof. Eduardo C. S. Thomaz	pág. 11/11
---	--------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------	------------

## Resumo dos testes $L / V$ realizados na Alemanha



- $L$  = Força transversal devida ao atrito nas rodas do eixo esconso
- $V$  = Carga vertical no eixo esconso
- **Norma NBR 7187/1987**
- 7.2.1.4 - Choque Lateral : Força horizontal aplicada no topo dos trilhos, normal ao eixo da linha, com valor característico igual a **20 %** da carga do eixo mais pesado.
- Sugiro usar 10% a 15% da carga total do trem.