

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Parcer

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Casimiro Dias Gadanha Junior e aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de abril de 1993. Campinas, 21 de junho de 1993

  
Presidente da Banca

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA AO  
ROLAMENTO EM FUNÇÃO DA LASTRAGEM, PRESSÃO DE  
INSUFLAGEM E VELOCIDADE DE UM PNEU DIAGONAL  
AGRÍCOLA EM SOLO PREPARADO.

CASIMIRO DIAS/GADANHA JUNIOR 226

Orientador: Prof. Dr. Oscar A. <sup>Antonio</sup> Braunbeck f.

1993

Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE em Engenharia Agrícola na área de concentração de Máquinas Agrícolas.

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO EM  
FUNÇÃO DA LASTRAGEM, PRESSÃO DE INSUFLAGEM E VELOCIDADE DE  
UM PNEU DIAGONAL AGRÍCOLA EM SOLO PREPARADO.

CASIMIRO DIAS GADANHA JUNIOR

Aprovado em: 27.04.93

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck	FEAGRI/UNICAMP
Prof. Dr. Paulo Graziano Magalhães	FEAGRI/UNICAMP
Prof. Dr. Kleber Pereira Lanças	FCA/UNESP

Prof. Dr. OSCAR ANTONIO BRAUNBECK  
- Orientador -

In memória de minha  
mãe Preciosa

**MEU RECONHECIMENTO**

À minha esposa Maria de Lourdes e  
ao (a) meu (minha) filho (a) que  
neste instante está em gestação

**DEDICO**

À minha família e a  
de minha esposa

**OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck, orientador e amigo, pela dedicação e apoio demonstrado na realização deste trabalho.

Ao colega Prof. Dr. Luiz Antonio Balastreire pelas sugestões e apoio.

Ao colega Prof. Dr. Marcos Milan, pelo incentivo, sugestões, colaboração e revisão do texto.

A Universidade Estadual de Campinas, através da Faculdade de Engenharia Agrícola, pela oportunidade oferecida.

A todos os colegas e professores do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ, pelo incentivo e compreensão.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP: Francisco de Oliveira, Gilmar B. Grigolon, José Ferreira de Oliveira, José Geraldo Gomes e Luiz Afonso da Costa que tanto colaboraram na concretização deste trabalho.

Aos funcionários da Prefeitura do Campus Piracicaba da USP que também colaboraram na concretização deste trabalho.

Aos funcionários Engo Juarez Renó Amaral e Marcelo Antonio Michelotto, responsável e técnico respectivamente pelo laboratório de instrumentação do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP.

A Divisão de Engenharia Agrícola, do Instituto Agronômico de Campinas, na pessoa da Enga Agrícola Ila Maria Corrêa, pela sessão dos pneus para os ensaios.

A empresa Black Rubber & Mescar Ltda e Usina Costa Pinto, pelo auxílio na construção e modificações na carreta tanque.

Aos professores Roberto Simionato Moraes e Sônia Maria De Stefano Piedade pelas sugestões e contribuições na análise estatística.

À Neide Aparecida Monti, secretária do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP pela sua atenção e dedicação na digitação deste trabalho.

A todos aqueles não citados que direta ou indiretamente colaboraram na concretização deste trabalho.

O nosso  
Muito obrigado

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS . . . . .	viii
LISTA DE TABELAS . . . . .	xi
RESUMO . . . . .	xiii
SUMMARY . . . . .	xv
1. INTRODUÇÃO . . . . .	1
2. REVISÃO DE LITERATURA . . . . .	2
2.1. Considerações teóricas. . . . .	2
2.2. Estudos experimentais . . . . .	13
3. MATERIAL E MÉTODOS . . . . .	27
3.1. Material. . . . .	27
3.1.1. Área experimental. . . . .	27
3.1.2. Tratores . . . . .	28
3.1.3. Pneumáticos. . . . .	28
3.1.4. Carreta tanque . . . . .	29
3.1.5. Equipamentos de medição. . . . .	29
3.1.5.1. Medição de força e velocidade. . . . .	29
3.1.5.2. Medição de pressão . . . . .	30
3.1.6. Balança de plataforma. . . . .	30
3.2. Métodos . . . . .	31
3.2.1. Delineamento experimental. . . . .	31
3.2.2. Programação dos ensaios. . . . .	31
3.2.3. Determinação da resistência ao rolamento . . . . .	32
3.2.4. Metodologia dos ensaios . . . . .	33

3.2.4.1. Comboio de Ensaio. . . . .	33
3.2.4.2. Execução dos ensaios . . . . .	34
3.2.5. Metodologia para caracterização do solo . . . . .	35
3.2.5.1. Umidade . . . . .	35
3.2.5.2. Granulometria. . . . .	36
3.2.6. Metodologia estatística para análise e interpretação. . . . .	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	38
4.1. Caracterização das condições de campo . . . . .	38
4.2. Dados obtidos . . . . .	38
4.3. Análise de variância dos dados. . . . .	39
4.4. Análise individual dos fatores na resistência ao rolamento. . . . .	40
4.4.1. Lastro . . . . .	40
4.4.2. Pressão de insuflagem. . . . .	44
4.4.3. Velocidade . . . . .	45
4.4.4. Lastro - Pressão de insuflagem . . . . .	50
4.4.5. Lastro - Velocidade. . . . .	55
4.4.6. Velocidade - Pressão de insuflagem . . . . .	59
4.5. Equação empírica para estimar a resistência ao rolamento . . . . .	63
5. CONCLUSÕES . . . . .	65
5.1. Conclusões em relação aos parâmetros avaliados . . . . .	65
5.2. Comentários gerais. . . . .	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. . . . .	67
APÊNDICES . . . . .	72

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Ilustração mostrando a Teoria de Bekker de afundamento em função da resistência ao rolamento . . . . .	3
Figura 2 - Forças agindo em um rodado rebocado . . . . .	6
Figura 3 - Forças agindo em um rodado motriz . . . . .	7
Figura 4 - Comportamento teórico da resistência ao rolamento de um rodado pneumático em duas condições de solo . . . . .	9
Figura 5 - Relação torque (Q), força de tração (P) e patinamento (s) em três situações possíveis de um rodado de trator no solo. . . . .	11
Figura 6 - Comboio de ensaio . . . . .	33
Figura 7 - Planilha de campo . . . . .	34
Figura 8 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, pneu 18.4/34 em função do lastro, em kN . . . . .	43
Figura 9 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34 em função da pressão de insuflagem, em kPa . . . . .	46

Figura 10 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função da velocidade, em m/s . . . . .	49
Figura 11 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função da pressão de insuflagem, em kPa, para os três níveis de lastro, em kN . . . . .	52
Figura 12 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função do lastro, em kN, para os três níveis de pressão de insuflagem, em kPa . . . . .	54
Figura 13 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função da velocidade, em m/s, para os cinco níveis de lastro, em kN . . . . .	57
Figura 14 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função do lastro, em kN, para os três níveis de velocidade, em m/s . . . . .	58
Figura 15 - Valores Plotados de resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função do lastro, em kN, para os três níveis de pressão de insuflagem, em kPa . . . . .	61
Figura 16 - Valores plotados de resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função da velocidade, em m/s, para os três níveis de pressão de insuflagem, em kPa . . . . .	62
Figura 17 - Vista geral da carreta tanque . . . . .	77

- Figura 18** - Diagrama de blocos dos elementos componentes do conjunto dinamométrico durante a calibração da célula de carga . . . 79
- Figura 19** - Diagrama de blocos dos elementos componentes do conjunto dinamométrico para aquisição de dados durante os ensaios . . 80
- Figura 20** - Diagrama de blocos dos elementos componentes do conjunto odométrico operando com o conjunto dinamométrico . . . . . 81

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Resistência ao rolamento, em kN, de um pneu acionado 18.4/15-34 em três condições de solo . . . . .	24
Tabela 2 - Análise de variância dos dados . . . . .	39
Tabela 3 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, para o fator lastro e o coeficiente de resistência ao rolamento ( $C_{RR}$ ) . . . . .	40
Tabela 4 - Comparação do coeficiente de resistência ao rolamento (%) obtido nos ensaios com modelos empíricos . . . . .	42
Tabela 5 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, para a variável pressão de insuflagem, em kPa . . . . .	44
Tabela 6 - Análise estatística fixando os níveis do fator velocidade em $V_1$ , $V_2$ e $V_3$ . . . . .	47
Tabela 7 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, para a variável velocidade, em m/s . . . . .	47

<b>Tabela 8</b> - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, para o pneu 18.4/34 dentro de (110; 152 e 193 kPa) da variável pressão de insuflagem e (9,3; 11,3; 13,5; 16,5 e 19,4 kN) da variável lastro . . . . .	50
<b>Tabela 9</b> - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, para o pneu 18.4/34 dentro de (1,33; 1,92; 3,07m/s) do fator velocidade e (9,3; 11,3; 13,5; 16,5 e 19,4 kN) do fator lastro . . . . .	55
<b>Tabela 10</b> - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, para o pneu 18.4/34 dentro de (110; 152 e 193 kPa) do fator pressão de insuflagem e (1,33; 1,92 e 3,07 m/s) do fator velocidade . . . . .	59
<b>Tabela 11</b> - Condições de lastro por pneu utilizadas nos ensaios . . . . .	78

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO EM FUNÇÃO DA LASTRAGEM, PRESSÃO DE INSUFLAGEM E VELOCIDADE DE UM PNEU DIAGONAL AGRÍCOLA EM SOLO PREPARADO.**

**Aluno:** CASIMIRO DIAS GADANHA JUNIOR

**Orientador:** PROF. DR. OSCAR ANTONIO BRAUNBECK

**RESUMO**

Ensaio para avaliação da resistência ao rolamento de um pneu agrícola rebocado de dimensões 18.4/34, de trator, foram conduzidos em solo agrícola preparado, sob três condições de pressão de insuflagem (110; 152 e 193 kPa), três condições de velocidade (1,33; 1,92 e 3,07 m/s) e cinco condições de lastro (9,3; 11,3; 13,5; 16,5 e 19,4 kN).

O delineamento experimental inteiramente casualizado com cinco repetições (3x3x5x5) foi o utilizado. Os dados foram levantados através de um comboio de ensaio composto por um trator de tração, um sistema automático de aquisição de dados, uma célula de carga, uma roda odométrica, um trator de frenagem e uma carreta tanque com os pneus de ensaio projetada de maneira que os seus eixos não permitam a sobreposição de rastros dos pneus durante o ensaio, o que poderia afetar os resultados procurados.

Das três variáveis estudadas, o lastro foi o que mostrou maior influência na resistência ao rolamento do pneu, em seguida tem-se a velocidade e com a menor influência tem-se a pressão de insuflagem.

A resistência ao rolamento aumentou linearmente com o aumento do lastro sobre o pneu. O modelo ajustado aos dados foi:

$RRL \text{ (kN)} = 0,072 + 0,055 \cdot L \text{ (kN)}$  ( $R^2 = 0,99$ ), na faixa de 9,3 a 19,4 kN de lastro. Foi encontrado um coeficiente de resistência ao rolamento de 5,5%.

A resistência ao rolamento aumentou linearmente com o aumento da velocidade. O modelo ajustado aos dados foi:

$RRV \text{ (kN)} = 0,732 + 0,0542 \cdot V \text{ (m/s)}$  ( $R^2 = 0,81$ ), na faixa de 1,33 a 3,07 m/s de velocidade. Foram encontrados valores de resistência ao rolamento ao redor de 54,2 N para uma variação na velocidade de 1 m/s.

A resistência ao rolamento aumentou linearmente com o aumento da pressão de insuflagem. O modelo ajustado aos dados foi:

$RRP \text{ (kN)} = 0,73 + 0,00077 \cdot P \text{ (kPa)}$  ( $R^2 = 0,97$ ), na faixa de 110 a 193 kPa de pressão de insuflagem. Foram encontrados valores de resistência ao rolamento de 0,77 N para uma variação de 1 kPa na pressão de insuflagem.

O modelo empírico desenvolvido de modo a permitir estimar a resistência ao rolamento (RR) à partir dos intervalos avaliados das variáveis velocidade (V), pressão de insuflagem (P) e lastro (L) foi:

$$RR \text{ (kN)} = - 0,162 + 0,0510 \cdot V \text{ (m/s)} + 0,000779 \cdot P \text{ (kPa)} \\ + 0,0560 \cdot L \text{ (kN)}$$

THE ROLLING RESISTANCE OF AN AGRICULTURAL TYRE AS A  
FUNCTION OF TYRE LOAD, TYRE PRESSURE AND VELOCITY IN A  
CULTIVATED SOIL.

Candidate: CASIMIRO DIAS GADANHA JUNIOR

Supervisor: PROF.DR. OSCAR ANTONIO BRAUNBECK

SUMMARY

The rolling resistance performance of a 18.4/34 agricultural tyre was evaluated in a cultivated soil for five tyre load conditions (9.3; 11.3; 13.5; 15.5 and 19.4 kN), three tyre pressures (110, 152 and 193 kPa) and three speeds (1.33; 1.92 and 3.07 m/s). A randomized complete block design with five repetitions was used (5x3x3x5). The experiment was performed using an experimental trailer pulled by a tractor. The trailer's axles were designed to prevent the rear tyres to run on the same track of the front tyres.

The tyre load was the variable that had the main influence on the rolling resistance, followed by speed and tyre pressure. The rolling resistance increased linearly with the three variables and the linear empirical models were adjusted as follow:

$RR_1$  (kN) = rolling resistance as a function of the  $i^{th}$   
variable

Where  $i^{th}$  = tyre load (L)

velocity (V)

tyre pressure (P)

For the variables range analysed the rolling resistance coefficient found was 5.5% for the tyre load. As the speed increases by 1.0 m/s the rolling

resistance increases by 54.2N, and for each kPa of additional tyre pressure the resistance increases by 0.77N.

An empirical model using multiple linear regression was adjusted for the three variables as follow:

$$\begin{aligned} RR \text{ (kN)} = & - 0,162 + 0.510V \text{ (m.s)} + 0.000779 \text{ (kPa)} \\ & + 0.0560L \text{ (kN)} \end{aligned}$$

## 1. INTRODUÇÃO

As perdas mais significativas na transmissão de potência em um trator agrícola ocorrem na área de contacto pneu-solo, onde existe o fenômeno de tração. Essas perdas, que acontecem em qualquer situação prática, são devidas a dois fatores: o patinamento e a resistência ao rolamento.

A resistência ao rolamento é a potência consumida para deslocar livremente um pneu. Os principais fatores que a afetam são: pressão de insuflagem, diâmetro externo, largura, lastro, deflexão, tipo de construção, material de fabricação, altura das garras e patinamento do pneu, declividade e condições da superfície, temperatura, velocidade de trabalho e tipo de solo. As perdas de potência devido a esses fatores podem chegar, em algumas situações, até 19% (KRAVIG, 1986).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência das variáveis pressão de insuflagem, lastro e velocidade na resistência ao rolamento de um pneu traseiro rebocado de trator.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

A intensidade de força requerida de um trator agrícola em operação está diretamente ligada a três finalidades: prover a tração necessária à máquina/implemento, vencer a resistência ao rolamento e ultrapassar os desníveis do terreno.

A força requerida para tracionar uma roda em uma superfície plana e horizontal denomina-se de resistência ao rolamento.

### 2.1. Considerações Teóricas

McKIBBEN & THOMPSON (1939), já consideravam importante a resistência ao rolamento no desempenho de máquinas. Os autores ensaiaram roda rígida de aço e rodado pneumático adaptados a duas máquinas para aplicação de fertilizante orgânico sólido.

BEKKER (1956), mostrou que a resistência ao rolamento apresenta maior redução devido ao aumento no diâmetro do que pelo correspondente aumento na largura da roda. Essa conclusão apresenta limitações em sua aplicação uma vez que o aumento do diâmetro do rodado influi no espaço exigido para a sua instalação.

Para estimar a profundidade do sulco deixado por uma roda rígida no seu rastro em solo solto, BEKKER (1962) desenvolveu uma teoria de acordo com a Figura 1.

O autor considerou uma carga vertical  $W$  e um elemento de superfície da roda.

Essa aproximação envolve duas suposições:

- a força de reação do solo é perpendicular a superfície da roda e passando pelo seu eixo. O valor dessa força de reação é a tensão  $p$  multiplicado pela área elementar  $dA$ .
- a tensão  $p$  é igual a tensão sobre uma placa que está sendo pressionada para o interior do solo na mesma profundidade do elemento de superfície.

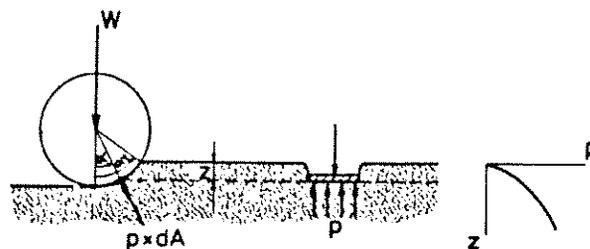


Figura 1 - Ilustração mostrando a teoria de Bekker do afundamento em função da resistência ao rolamento.

FONTE: KOOLEN & KUIPERS (1983).

Quando a relação tensão ( $p$ ) e profundidade ( $z$ ) é determinada utilizando-se a placa, todas as tensões na superfície da roda ficam conhecidas. O ensaio com a placa caracteriza o comportamento do solo no local (relação tensão - deformação). Matematicamente o resultado

do ensaio pode ser expresso pela seguinte equação empírica:

$$p = \left[ \frac{K_c}{b} + K_\theta \right] z^n \dots\dots\dots \text{Eq. 1}$$

Onde  $K_c$ ,  $K_\theta$  e  $n$  são parâmetros do solo. Uma equação de equilíbrio pode ser formulada pela posição de  $W$  em equilíbrio com a soma de todos os componentes de tensão vertical na superfície da roda. Pela resolução desta equação de equilíbrio, a profundidade do sulco no rastro do pneu,  $z$ , pode ser calculada de forma simplificada por:

$$z = \left[ \frac{3W}{(3-n) \cdot b \cdot \left[ \frac{K_c}{b} + K_\theta \right] \cdot \sqrt{2 \cdot r}} \right]^{\left[ \frac{2}{2n+1} \right]} \dots\dots\dots \text{Eq. 2}$$

onde  $b$  é a largura da roda e  $r$  o seu raio.

No cálculo da resistência ao rolamento  $R$  assume-se que a energia ( $A$ ), dispendida para fazer um sulco de comprimento  $l$  (de tal modo que  $A = R \cdot l$ ), é igual a energia utilizada em forçar uma placa de comprimento  $l$  e largura  $b$  no solo, a uma profundidade  $z$ . Então:

$$A = R \cdot l = \int_0^z b \cdot l \cdot p \cdot dz = b \cdot l \cdot \int_0^z \left[ \frac{K_c}{b} + K_\theta \right] z^n dz \dots\dots \text{Eq. 3}$$

$$A = b \cdot l \cdot \frac{K_c/b + K_\theta}{n+1} \cdot d^{n+1} \dots\dots\dots \text{Eq. 4}$$

$$\text{então } R = b \cdot \frac{Kc/b + K_0}{n + 1} \cdot z^{n + 1} \dots\dots\dots \text{Eq. 5}$$

Segundo ONAFEKO (1969), as perdas em uma roda podem ser divididas em três partes: interna, de rotação e de translação. A interna é devido ao atrito de rolamento da árvore e outras imperfeições mecânicas juntamente com a deflexão da carcaça no caso de rodados pneumáticos. A perda por deflexão é usualmente desprezível para rodas rígidas, mas podem ser consideráveis nos rodados pneumáticos com baixa pressão de insuflagem. As perdas de rotação ou deformação por cisalhamento podem ser atribuídas ao patinamento e a força tangencial desenvolvida por uma roda que suporta parte do peso no eixo. A perda de translação é resultante da componente horizontal da força radial que se opõe ao movimento linear de translação. O principal efeito dessa força, esta na redução da força de tração na roda. Na mecânica de solo aplicada a veículos, a equação básica para tração na barra é dada por:

$$L = H - R \dots\dots\dots \text{Eq. 6}$$

onde: L → força de tração

H → força de tração bruta

R → resistência total ao movimento

O autor considera também que assumir a resistência ao rolamento constante de uma roda movida é errado.

O estudo do rodado de um trator na forma de um diagrama de corpo livre foi analisado por BEKKER (1962) BARGER et al. (1963), PERSON (1967), CHANG & COOPER (1968), WISMER & LUTH (1974), KOOLEN & KUIPERS

(1983) e BRIXIUS (1987). Esses autores tecem considerações quanto aos aspectos dinâmicos de elementos em rotação. A Figura 2, mostra uma roda rebocada carregando uma carga vertical  $W$  sobre uma superfície plana. Para isto uma força de tração  $P$  é requerida porque o rodado está submetido a uma reação  $R$  na superfície de

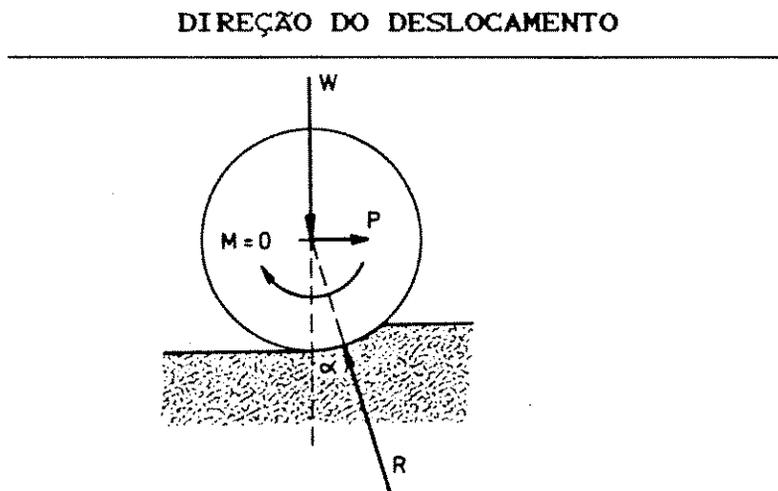


Figura 2 - Forças agindo em um rodado rebocado.

FONTE: KOOLEN & KUIPERS (1983).

contacto. Se o atrito do eixo for desprezado o torque  $M$  na roda é nulo e isto significa que a linha de ação de  $R$  passa pelo centro do eixo. O equilíbrio de forças na direção horizontal implica que  $P$  deve ser igual a componente horizontal de  $R$ . Essa componente de  $R$  é denominada de força de resistência ao rolamento. O equilíbrio de forças na direção vertical implica que a componente vertical de  $R$  deve ser igual a  $W$ . No caso da superfície do solo tornar-se mais difícil ao tráfego,  $\alpha$  e  $R$  aumentam, fazendo com que  $P$  aumente também, o mesmo ocorre com  $R$  e  $P$  se  $W$  aumentar.

A razão  $W/P$  é denominada de coeficiente de resistência ao rolamento.

A Figura 3, mostra uma roda tratora carregando uma carga  $W$ , utilizado para desenvolver uma força de

tração  $P$  e para superar uma força de reação  $R$  na superfície de contacto. Quando o atrito no eixo é desprezado, o torque no rodado é  $M = R.e$ . O equilíbrio das componentes das forças requer que  $P$  seja igual a componente horizontal de  $R$  e que  $W$  seja igual a componente vertical de  $R$ . Quanto maior for a tração  $P$  requerida,  $\beta$  e  $R$  aumentam, entretanto,  $P$  não pode exceder um máximo, o qual depende de  $W$ . Em geral, o valor de  $P$  aumenta com  $W$ .

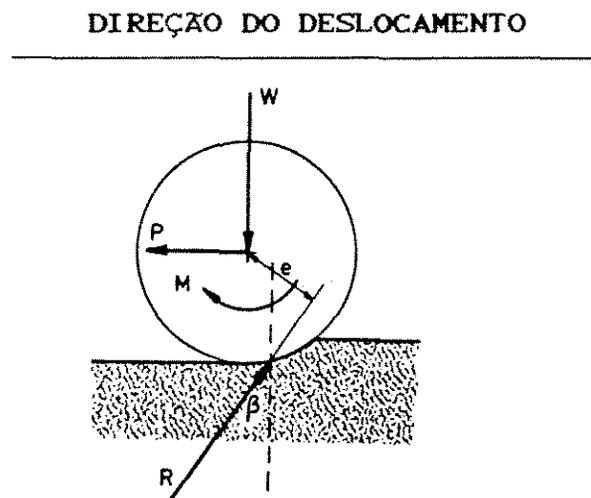


Figura 3 - Forças agindo em um rodado motriz.

FONTE: KOOLEN & KUIPERS (1983).

Com o aumento de  $W$ , o afundamento interfere cada vez mais na própria ação no elemento rodado. A tração  $P$  também pode ser limitado pelo torque no rodado.

Considerando o princípio da conservação da energia para um rodado motriz tracionando, observa-se as seguintes variáveis: a resistência ao rolamento, tração bruta e eficiência de tração. Para uma revolução do rodado tem-se que:

$$\text{Energia fornecida} = 2\pi \cdot M \dots \dots \dots \text{Eq. 7}$$

$$\text{Energia na barra} = 2\pi \cdot r_r P \dots \dots \dots \text{Eq. 8}$$

$$\text{Energia dissipada} = \text{energia de resistência ao} \\ \text{rolamento} = 2\pi (M - r_r P) \dots \dots \dots \text{Eq. 9}$$

onde:  $r_r \rightarrow$  raio estático do rodado.

A força de resistência ao rolamento aparente (S) é definida como:

$$S = \frac{\text{Energia dissipada}}{\text{distância percorrida}} = \frac{2\pi (M - r_r \cdot P)}{2\pi \cdot r_r} = \frac{M - r_r \cdot P}{r_r} \dots \text{Eq. 10}$$

portanto:

$$P = \frac{M}{r_r} - S \dots \dots \dots \text{Eq. 11}$$

$M/r_r$  é chamado de tração bruta.

A eficiência de tração é definida por:

$$\frac{\text{Energia na barra}}{\text{Energia fornecida}} = \frac{2\pi r_r P}{2\pi M} = \frac{P}{M} \cdot r_r \dots \dots \text{Eq. 12}$$

Se necessário,  $r_r$  nas fórmulas pode ser substituído por um termo que inclui a porcentagem de patinamento, s:

$$r_r = \frac{V_{th}}{2\pi N} \cdot \left[ 1 - \frac{s}{100} \right] \dots \dots \dots \text{Eq. 13}$$

$$r_r = \frac{V_{act}}{2\pi N} \quad \text{e} \quad V_{act} = V_{th} \left[ 1 - \frac{s}{100} \right] \dots \dots \dots \text{Eq. 14}$$

$N \rightarrow$  rotação do rodado

onde:  $V_{th} \rightarrow$  velocidade teórica de deslocamento do rodado.

$V_{act} \rightarrow$  velocidade real.

A energia de resistência ao rolamento é dissipada nas deformações do rodado e do solo e do atrito na superfície de contacto.

O gráfico da Figura 4 mostra a relação entre  $P$  e  $W$  para um rodado rebocado em condições de solo solto e firme. A força de resistência ao rolamento  $P$  depende da superfície abaixo dos pneus e da carga  $W$ . O coeficiente de resistência ao rolamento também depende da carga  $W$ , e sendo menos influenciado pela superfície. As curvas estão limitadas à direita porque a carga  $W$  máxima é função da deflexão permitida para o rodado. Em um rodado de dimensões maiores as curvas se deslocam para direita e para cima. Para um dado  $W$ ,  $P$  varia com a superfície. Uma pressão de insuflagem maior desloca as curvas para cima, mantendo os limites à direita; o mesmo ocorre para valores de carga maiores. O rodado possui uma pressão máxima admissível à qual depende da construção da carcaça e número de lonas. As curvas são influenciadas pela banda de rodagem e velocidade de deslocamento.

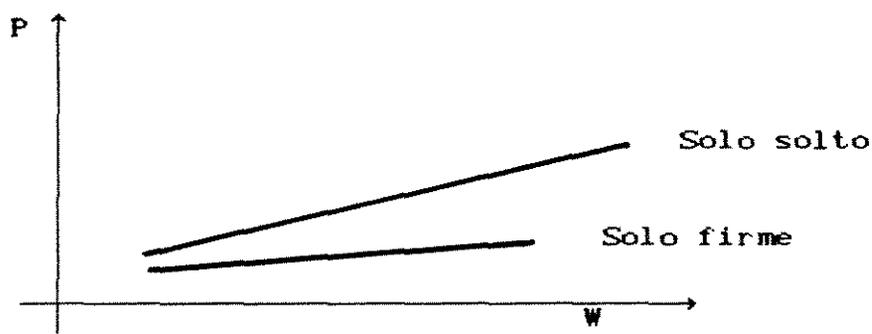


Figura 4 - Comportamento teórico da resistência ao rolamento de um rodado pneumático em duas condições de solo.

FONTE: KOOLEN & KUIPERS (1983).

A força  $R$  nas Figuras 2 e 3 é a resultante de tensão normal e de cisalhamento na área de contato entre o rodado e o solo.

As tensões sobre um rodado rígido dependem principalmente da dimensão da área de contato com o solo. Quando a área é pequena, as tensões serão altas. Se o solo não pode suportar essas altas tensões, sem ser deformado, o elemento afunda aumentando as dimensões da área até que a capacidade de sustentação do solo requerida seja alcançada.

A diferença essencial entre uma roda rígida e um rodado pneumático é que este pode deformar-se. Em geral um rodado pneumático movendo-se em solo solto sofrerá uma deformação e afunda formando rastro. As forças de deformação do rodado e reações de afundamento do solo se balanceiam. Em casos extremos tem-se:

- em superfície rígida: implica apenas na deformação do pneu e não formação de rastro.

- em altas pressões de insuflagem, implica em apenas formação de rastro e não deformação do pneu.

A Figura 5, utilizada por WISMER & LUTH (1974) e BRIXIUS (1987) diferem as três situações possíveis de um rodado de trator em relação ao torque, a força de tração e ao patinamento.

O rodado rebocada é montada sobre um semi-eixo, sendo o torque nulo ( $M = 0$ ) quando não equipada com sistema de frenagem e desprezando-se o atrito do mancal. A força para rebocá-la (TF), conhecida como resistência ao rolamento, é negativa e possui um patinamento negativo. O rodado autopropelido é montado sobre uma semi-árvore motriz cujo torque (MD) é aplicado simplesmente para vencer a resistência ao rolamento (RR). Este modelo se aplica aos veículos de transporte, aos quais não há exigência de desempenho para tração ( $P = 0$ ). No rodado do motriz, a medida que cresce o valor do torque (Q), ocorre um acréscimo na patinagem, que é positiva e

aumento da força de tração (P), até atingir um valor máximo.

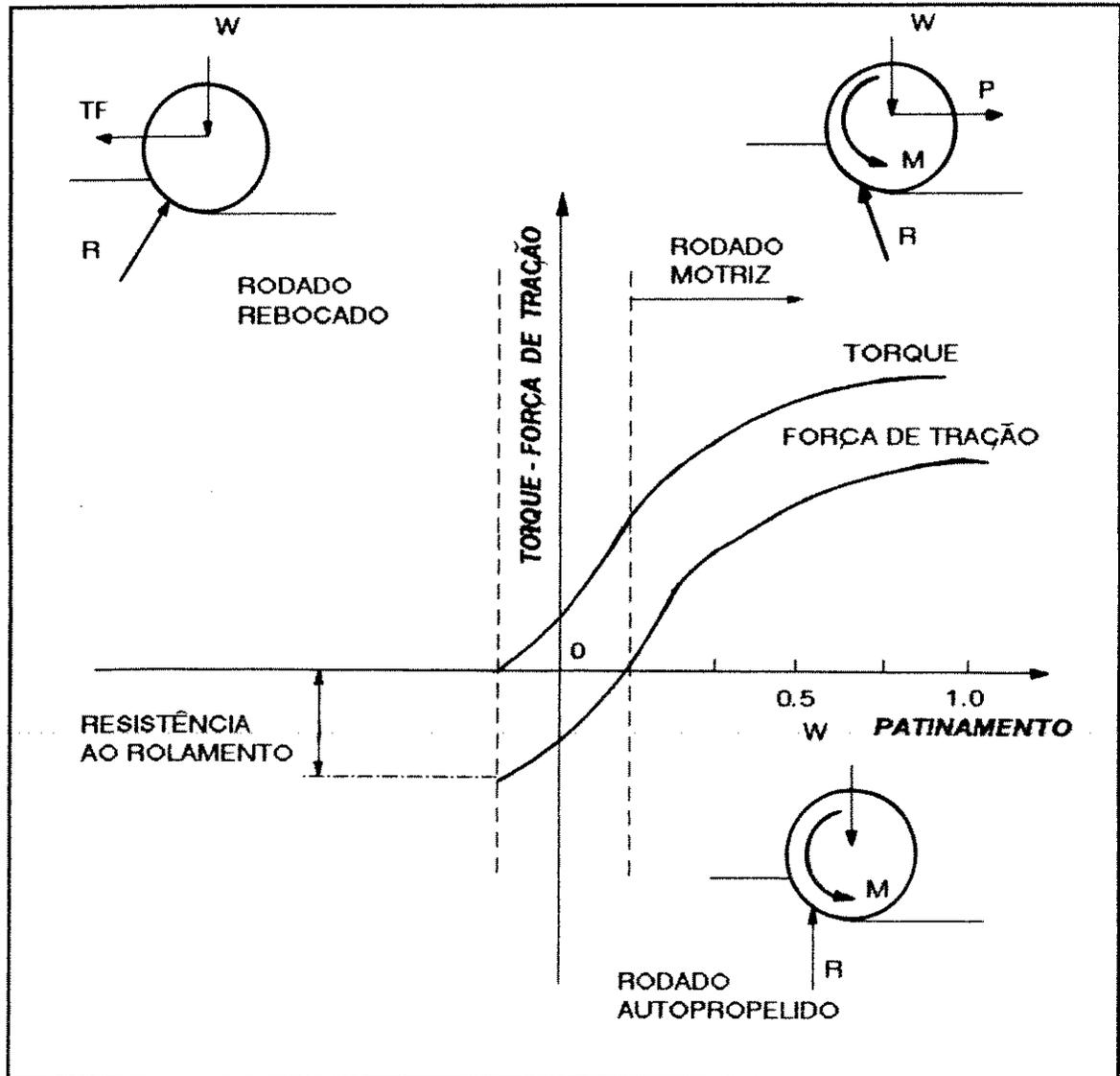


Figura 5. Relação torque (M), força de tração (P) e patinamento (s) em três situações possíveis de um rodado de trator no solo.

FONTE: WISMER & LUTH (1974).

YONG et al. (1984), consideram a resistência ao rolamento de um rodado em movimento como a somatória dos seguintes componentes: a) resistência ao rolamento encontrada devido a compactação da superfície de sustentação na direção vertical; b) resistência ao rolamento devido ao esforço para movimentação do solo na direção horizontal e c) resistência ao rolamento devido a deformação do rodado em movimento.

ALCOCK (1986) cita estudos de REECE<sup>1</sup> onde a pressão sobre uma roda rígida sem atrito com o solo para pequenos afundamentos é dado por:

$$\frac{p}{c} = 5,7 \dots\dots\dots \text{Eq. 15}$$

onde: p = pressão  
c = coesão do solo

O afundamento necessário Z para suportar a roda para uma pressão radial é dada pela equação:

$$Z = - \frac{W^2}{(5,7 \cdot c)^2 b^2 \cdot d} \dots\dots\dots \text{Eq. 16}$$

onde: b = largura do rodado  
d = diâmetro do rodado  
W = carga vertical no rodado

A resistência ao rolamento é devido principalmente ao trabalho executado na formação dos sulcos no solo. A distância vertical deslocada é igual ao próprio afundamento Z. O trabalho executado para o afundamento Z de um rodado pneumático é dado por:

---

1 REECE, A.R. Principles of soil-vehicle mechanics. Proc. Inst. Mech. Engr. 180. Part 2A(2), 45-66. 1966.

$$E_r = 5,7 \cdot c \cdot b \cdot Z \dots\dots\dots \text{Eq. 17}$$

onde:  $E_r$  = energia requerida para formar os sulcos.  
 $b$  = largura do rodado

Considerando que a energia requerida para a formação dos sulcos é tão somente devido a resistência ao rolamento, pode-se escrever que essa força é dada por:

$$R = \frac{W^2}{5,7 \cdot c \cdot b \cdot d} \dots\dots\dots \text{Eq. 18}$$

## 2.2. Estudos experimentais

McKIBBEN and DAVIDSON (1939), publicaram resultados de resistência ao rolamento para 6 rodas rígidas de aço e 17 rodados pneumáticos sob 3 condições de carga (2,2; 4,4 e 6,7 kN), 9 condições de superfície e a uma velocidade de 0,89 m/s (3,22 km/h). Os resultados obtidos nos ensaios apresentam uma variação irregular devido a interação de um grande número de fatores que determinam a resistência ao rolamento de rodados movidos. Alguns desses fatores são: a estrutura, textura, condições de cobertura e umidade do solo. Esses autores citaram resultados os quais mostram que a variação da velocidade dentro da faixa operacional de campo não tem efeito importante sobre a resistência ao rolamento de rodados movidos.

McKIBBEN & DAVIDSON (1940a,b) apresentaram dados de resistência ao rolamento para pneus 6.00-16 montados na conformação simples e duplo, duas condições de carga (2,2; 4,4 kN) e em 3 condições de superfície: pasto, solo preparado e areia solta. A formação dupla reduziu a resistência ao rolamento particularmente para cargas

maiores em superfície de areia solta, onde a redução chegou a 34%. Estudando o espaçamento entre rodados no arranjo duplo (0,20; 0,30 e 0,40m), o intermediário apresentou ligeira vantagem em relação a outros espaçamentos.

McKIBBEN & DAVIDSON (1940c,d) estudaram o efeito da largura e diâmetro de 16 pneus agrícolas na resistência ao rolamento sob 4 condições de superfície, 4 condições de lastro e a uma pressão de insuflagem. Analisando os resultados obtidos concluiu-se que o diâmetro externo é um fator que influencia o coeficiente de resistência ao rolamento em condição de superfície solta. Aumentando-se o diâmetro externo ocorre uma diminuição significativa no coeficiente de resistência ao rolamento. A variação da largura do pneu tem pequeno efeito sobre o coeficiente de resistência ao rolamento exceto no caso de pneus menores operados em superfície de solo solto. Os autores desenvolveram um modelo exponencial que relaciona o coeficiente de resistência ao rolamento com o diâmetro externo do pneu.

McKIBBEN & DAVIDSON (1940e), estudaram o efeito da pressão de insuflagem na resistência ao rolamento de pneus agrícolas 6.00-16 e 7.50-28 utilizados em implementos para transporte. Os ensaios foram executados em 4 condições de superfície: concreto, pasto, solo preparado e areia solta. O pneu 6.00-16 foi lastrado com as seguintes cargas: 2,2; 4,4 e 6,7 kN. Para o pneu 7.50-28 as condições de carga foram: 4,4; 6,7 e 8,9 kN. Da análise dos resultados obtidos pelos autores concluiu-se que a redução na pressão de insuflagem aumenta o trabalho de deformação do pneu mas diminui a energia dispendida no recalque do solo. Em superfície rígida plana, como a de concreto, onde não existe deslocamento da superfície, reduzindo a pressão de insuflagem aumenta-se a resistência ao rolamento. Em uma superfície de areia solta,

reduzindo-se a pressão de insuflagem ocorre uma diminuição na resistência ao rolamento. Na condição de superfície com pasto as mudanças na pressão de insuflagem tem um pequeno efeito na resistência ao rolamento. Se uma máquina agrícola é operada intensivamente em solo solto, o uso de pneus com maior capacidade de carga os quais admitem pressões de insuflagem menores pode ser justificado pela economia na potência requerida.

McKIBBEN & HULL (1940), estudaram a relação entre a penetração obtida com penetrômetros e a resistência ao rolamento de rodados pneumáticos, encontrando coeficientes de correlação bastante altos.

POPE (1971), analisou a influência da velocidade de deslocamento de dois rodados rígidos sobre a resistência ao rolamento, em solos argilosos através da comparação com valores estimados por meio de ensaio de placas de penetração. Nesses ensaios o autor trabalhou em canal de solo com rodados rígidos de diâmetro 0,254 e largura de 0,0635 m. O rodado A possuía as suas laterais sólidas e o rodado B recortadas ao redor do centro, para considerar a coesão lateral do solo na roda A. As velocidades utilizadas foram: 0,01; 0,02; 0,04; 0,08 m/s. As condições de carga foram de 552 e 907 N. O autor concluiu que existe uma influência da velocidade na resistência ao rolamento, de tal maneira que obteve um aumento com a velocidades menores. Para maior carga essa diminuição em função da velocidade foi mais acentuada do que para a carga menor. Quanto aos dois tipos de rodados utilizados, não houve diferença significativa entre eles. O autor concluiu também que a utilização do ensaio de placas de penetração na estimativa da resistência ao rolamento é adequado. A necessidade de desenvolvimento de pesquisas para rodados pneumáticos foi também ressaltada.

WISMER & LUTH (1972), definiram um rodado rebocado onde o torque no eixo é zero desprezando o atrito

de rolamento. A força de deslocamento que é igual a resistência ao rolamento de um rodado pneumático rebocado é dependente da carga, das dimensões, da pressão de insuflagem e da resistência do solo. Para solos que não são facilmente compactáveis e pneus operados a pressões normais, isto é, com deflexão não superior a 20%, a força de deslocamento pode ser estimada por:

$$\frac{TF}{W} = \frac{1,2}{C_n} + 0,04 \dots\dots\dots Eq. 19$$

onde:

TF → força de deslocamento do rodado, paralelamente a superfície do solo.

W → carga dinâmica na roda, normal a superfície do solo.

C<sub>n</sub> → coeficiente numérico do rodado, definido por:

$$C_n = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W} \dots\dots\dots Eq. 20$$

CI → índice do cone medido com o penetrómetro conforme definido na ASAE (1983-4).

b → largura da secção do pneu não carregado.

d → diâmetro do pneu sem carga.

Para uma superfície firme como argila seca, o valor de C<sub>n</sub> foi grande e a força para deslocamento atingiu 4% da carga sobre o rodado. Esses valores obtidos foram atribuídos a flexibilidade do rodado e a superfície pouco vegetada. A relação de força de deslocamento foi desenvolvida para pneus com uma razão largura/diâmetro (b/d) de aproximadamente 0,30. Qualquer alteração desta razão pode-se esperar uma mudança quantitativa na força de deslocamento.

DWYER et al. (1974) definem coeficiente de resistência ao rolamento como sendo a força requerida para

deslocar um rodado com torque zero no eixo, dividido pela carga vertical sobre a mesma.

Os autores desenvolveram ensaios com 5 tipos de pneus de tratores em 33 condições de campo durante três anos. Com esses dados desenvolveram um modelo empírico que relaciona o coeficiente de resistência ao rolamento (CRR) com o número de mobilidade (M):

$$CRR = 0,07 + \frac{0,2}{M} \pm 0,05 \dots\dots\dots \text{Eq. 21}$$

Esses autores não encontraram variação na resistência ao rolamento com o patinamento na faixa de significado prático, isto é, até 20%.

McNAB et al. (1977) desenvolveram um modelo de simulação computacional para avaliar os efeitos do desempenho de tração e na resistência do solo na economia de combustível de tratores agrícolas. Nesse trabalho esses autores utilizaram os modelos de WISMER and LUTH (1972) para estimar a resistência ao rolamento de rodados movidos e a tração líquida. As limitações desse modelo foram atribuídas a operação dos pneus a uma pressão de insuflagem nominal à qual é definida como aquela que causa uma deflexão de 20% na altura de secção sem carga e a relação entre largura e diâmetro de aproximadamente 0,3.

GEE-CLOUGH (1980) utilizou-se de uma equação empírica estabelecida pelo N.I.A.E.<sup>2</sup>, e mostra como pode ser utilizado para fazer uma escolha racional das dimensões de um pneu para veículos fora de estrada.

---

<sup>2</sup> National Institute of Agricultural Engineering. SILSOE - ENGLAND.

A equação empírica desenvolvida para coeficiente de resistência ao rolamento foi:

$$C_{RR} = 0,049 + \frac{0,287}{M} \dots\dots\dots \text{Eq. 22}$$

$$M = \frac{C \cdot b \cdot d}{W} \cdot \sqrt{\frac{\delta}{h}} \cdot \left[ \frac{1}{1 + b/2d} \right] \dots\dots\dots \text{Eq. 23}$$

onde:

- $C_{RR}$  = coeficiente de resistência ao rolamento
- $M$  = número de mobilidade do pneu
- $C$  = índice do cone (kPa)
- $b$  = largura do pneu sem carga (m)
- $\delta$  = deflexão do pneu sob carga (m)
- $h$  = altura da secção do pneu sem carga (m)
- $W$  = carga dinâmica sobre o pneu (kN)
- $d$  = diâmetro externo do pneu sem carga (m)

RAMSHAN & WILLIAMS (1981) compararam o efeito dos principais fatores que afetam a resistência ao rolamento do pneu 7.00 x 20 na configuração radial e diagonal. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a resistência ao rolamento diminuiu significativamente com a mudança da configuração diagonal para a radial.

DWYER et al.<sup>3</sup> citado por KOOLEN & KUIPERS (1983) estudaram o desempenho de tração de um pneu agrícola 13.6-38 sob uma carga vertical de 13.85kN, na pressão de insuflagem de 80 kPa e para 19 diferentes condições de solo. Os autores concluíram que o desempenho durante a segunda passada foi geralmente melhor do que durante a primeira. Em média o coeficiente de tração à 20%

<sup>3</sup> DWYER, M.J.; MCALLISTER, M; EVERNDEN, D.W. Comparison of the tractive performance of a tractor driving wheel during its first and second passes in the same track. *Journal of Terramechanics*, Elmsford, 14(1):1-10, 1977.

de patinamento aumentou em 7%, a resistência ao rolamento reduziu em 11% e a eficiência de tração sofreu um acréscimo de 5%.

KOLLEN & KUIPERS (1983) comparando rodados de esteiras e de pneus no que se refere ao coeficiente de resistência ao rolamento concluíram que o da esteira é usualmente menor em condições de fora de estrada.

McALLISTER (1983) determinou o coeficiente de resistência ao rolamento para 8 modelos de pneus sob pressões e cargas estabelecidas pelos fabricantes. Foi mostrado que reduções no coeficiente de resistência ao rolamento podem ser feitas pela redução da pressão de insuflagem, redução da carga dinâmica, aumento do diâmetro ou largura do pneu e pela construção radial. O número de mobilidade definido por TURNAGE (1972)<sup>4</sup> foi utilizado para estimar o coeficiente de resistência ao rolamento.

Nesse mesmo trabalho o autor ajustou modelos para o coeficiente de resistência ao rolamento (CRR) em função do número de mobilidade, para os dois tipos de pneus utilizados no ensaio com nível de 0,1% de significância:

$$\text{CRR} = \frac{0,323}{M} + 0,054 \quad \text{pneus diagonais} \dots\dots\dots \text{Eq. 24}$$

$$\text{CRR} = \frac{0,321}{M} + 0,037 \quad \text{pneus radiais} \dots\dots\dots \text{Eq. 25}$$

Existem muito poucos estudos da resistência ao rolamento em aplicações florestais. HASSAN & SIROIS (1985) pesquisaram a resistência ao rolamento de rodados pneumáticos de skidders operando em declives superiores a

---

<sup>4</sup> TURNAGE, G. W. Tyre selection and performance prediction for of road wheeled. Vehicle operations. Proc. 4 th. Int. Conf. Inc. Soc. Terrain - Vehicle Systems. Stockholm. 1972.

20%. Três dimensões de pneus (18.4-26; 23.1-26 e 67/34.00-25) foram testados, cada um em três pressões de insuflagem (103; 138 e 172 kPa). Os resultados de seus estudos indicaram que: a) a resistência ao rolamento aumentou com a carga para todos os pneus utilizados, b) a pressão de insuflagem afetou a resistência ao rolamento muito pouco, não se podendo recomendar uma pressão ótima, c) a resistência ao rolamento aumentou com a largura do pneu, d) mais estudos são necessários em condições controladas para explicar as curvas levemente negativa, negativa e a exponencial para a resistência ao rolamento vs. carga dos pneus 18,4; 23,1 e 34.00 respectivamente. Este estudo sugere que aumentando-se a carga pode-se diminuir a resistência ao rolamento, um contraste direto com os estudos anteriores. Em outras pesquisas os mesmos autores estudaram a resistência ao rolamento de um skidder equipado com pneu duplo operando em condição de solo de baixíssima sustentação. As conclusões indicaram um efeito muito pequeno da pressão de insuflagem, entretanto, as condições altamente variáveis do solo podem ter afetado os resultados. Aumentando-se a carga dinâmica aumentou-se a resistência ao rolamento para cada combinação de pneu e pressão de insuflagem. Os resultados do estudo no caso florestal são conflitantes, indicando a necessidade de mais experimentos em condições controladas.

WOERMAN & BASHFORD (1984), estudando as vantagens e desvantagens de tratores tração simples (2WD) e nos quatro rodados (4WD) consideraram que a eficiência de tração poderia ser aumentada pela diminuição da perda de potência por resistência ao rolamento e patinamento. Os autores discutem como essas perdas mudam sobre diferentes superfícies e condições de carga. Na superfície de concreto as perdas de potência por patinamento diminuíram. As perdas de potência por resistência ao rolamento aumentaram com o aumento da velocidade e diminuição do

patinamento. A baixa velocidade e altas cargas na barra, a perda de potência por patinamento é dominante.

No desenvolvimento de um modelo de simulação por computador para estimar o desempenho de tratores agrícolas, ALBRIGHT et al. (1985) utilizaram as equações de WISMER & LUTH (1972) para definirem a força requerida para deslocar paralelamente a superfície do solo um pneu rebocado. Para solos com coesão e atrito interno, as equações obtidas foram:

$$SRF = \left[ \frac{1,2}{CNF} + 0,04 \right] \cdot F1y \quad SRR = \left[ \frac{1,2}{CNR} + 0,04 \right] \cdot F2y \quad \text{..Eq. 26}$$

onde:

CNF → Coeficiente numérico do rodado dianteiro

CNR → Coeficiente numérico do rodado traseiro

F1y → Carga dinâmica sobre o eixo frontal

F2y → Carga dinâmica sobre o eixo traseiro

SRF → Resistência ao rolamento do eixo frontal

SRR → Resistência ao rolamento do eixo traseiro

ALCOCK (1986) afirmou que o torque desejável no motor do trator deve superar as perdas na transmissão e a resistência ao rolamento na condição de tração na barra.

KRAVIG (1986), analisa alguns aspectos positivos de tratores com razão peso-potência baixa, entre os quais o menor afundamento dos pneus e menor resistência ao rolamento. Esse mesmo autor apresentou uma variação na porcentagem de perda de potência na tração entre 2 até 19% em função da superfície que o pneu esteja trabalhando.

ASHMORE et al. (1987) citam o trabalho de RUMMER & ASHMORE (1985)<sup>5</sup> onde esses autores encontram uma

---

<sup>5</sup> RUMMER, R. & C. ASHMORE. Factors affecting the rolling resistance of rubber-tired skidders. ASAE Technical Paper 85-1511. American Society of Agricultural Engineering. St. Joseph, Michigan, EE.UU., 17p.

equação para calcular a resistência ao rolamento através de ensaios com rodados pneumáticos de Log - Skidder em canal de solo. Utilizaram um pneu simples em uma condição de torque nulo. Os autores afirmam que a resistência ao rolamento desse pneumático estudado depende da carga dinâmica, do índice do cone, das dimensões do pneu e da carga máxima do pneu para certa pressão de insuflagem.

A equação adimensional para estimar a força de deslocamento é:

$$\frac{TF}{W} = - 0,10 \left( \frac{0,22}{WR} \right) + \frac{0,22}{C_n} + 0,20 \dots\dots\dots \text{Eq. 27}$$

onde:

TF → força de deslocamento do pneu paralelamente a superfície do solo.

W → carga dinâmica, perpendicular à superfície do solo.

Wr → carga máxima do pneu para uma pressão de insuflagem.

C<sub>n</sub> → coeficiente numérico adimensional do pneu igual a

$$C_n = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W} \dots\dots\dots \text{Eq. 28}$$

CI → índice do cone

b → largura do pneu

d → diâmetro do pneu

A resistência ao rolamento estudada por ASMORE et al. (1987) para o pneu 24.5/32 de Skidder, mostrou-se praticamente constante em relação ao patinamento.

DYWER et al. (1987) desenvolveram um manual para escolha do pneu para ser colocado em um trator. Esse manual estima a resistência ao rolamento por pneu em 3 condições de solo, 4 pressões de insuflagem e 4 cargas por pneu, não levando em consideração a velocidade de deslocamento.

Os autores consideram as três condições de solo em função do índice do cone para estudo do desempenho da tração de pneus. Uma condição considerada boa, onde não existia um afundamento visível do rodado com um índice do cone de 1500 KPa. Uma condição média onde existia a formação de sulcos rasos sem problemas para tração, com índice do cone de 700 KPa. Uma última condição denominada de ruim, onde existe a formação de sulcos profundos com danos consideráveis de tração, um índice do cone de 200 kPa. A Tabela 1, apresenta um resumo para o pneu 18,4/15-34.

A resistência ao rolamento não é um fator claro para o operador do trator mas é importante porque representa uma significativa perda de potência reduzindo a capacidade operacional.

Tabela 1 - Resistência ao rolamento, em kN, de um pneu acionado 18,4/15-34 em três condições de solo.

FONTE: DWYER & FEBO (1987) adaptado.

CARGA POR (kN)	(18,9)	(19,6)	(29,4)	(35,5)	
PNEU kgf	1925	2000	3000	3620	
PRESSÃO DE BAR	0,8	0,9	1,9	2,6	
INSUFLAGEM kPa	80	90	290	260	
RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO (kN)					
CONDIÇÃO DE SOLO	RUIM	2,8	3,0	6,1	8,5
	MÉDIA	1,5	1,5	2,8	3,7
	BOA	1,2	1,2	2,1	2,6

PEDROLETTI (1988) considera as perdas de energia, num trator 4x2, de 15% devido somente a resistência ao rolamento.

WITNEY (1988), também define o coeficiente de resistência ao rolamento como a razão entre a força de resistência ao rolamento pela carga normal sobre o pneu. Em condições normais de campo esse coeficiente varia de

0,1 a 0,3; aumentando com a lastragem.

STADIE et al. (1989) compararam a resistência ao rolamento de rodados pneumáticos movidos montados na conformação tandem e duplo. Primeiramente compararam um pneu radial 13.0/65-18 de conformação simples e dois pneus, 7.50-16 e 8 lonas, montados de forma dupla para 3 cargas (12,5; 16,5 e 20,0 kN) e 3 pressões de insuflagem (126, 202 e 303 KPa). Os resultados encontrados permitiram concluir que a resistência ao rolamento da conformação tandem foi aproximadamente 10% menor do que a dupla.

WANG & DOMIER (1989) analisaram o desempenho de um trator 4x2 com pneu duplo traseiro e estimaram os valores dos parâmetros de desempenho de duas formas: uma através do índice do cone e a outra por índice do cone e propriedades de cisalhamento do solo. Na estimativa da resistência ao rolamento, os autores propuseram mudanças na equação de WISMER and LUTH (1972) para não superestimar os valores. As equações propostas para coeficiente numérico do pneu duplo foram:

$$C_{n_d} = \frac{2 \text{ CI} \cdot b \cdot d}{W} \quad \text{para solo solto} \\ (\text{CI} < 446 \text{ kPa}) \dots\dots\dots \text{Eq. 29}$$

$$C_{n_d} = \frac{\text{CI} \cdot b \cdot d}{W} \quad \text{para solo firme} \\ (\text{CI} > 1113 \text{ kPa}) \dots\dots\dots \text{Eq. 30}$$

$$C_{n_d} = \frac{\text{CI} \cdot b \cdot d \left( a_0 + C_1 \text{ CI} \right)}{W} \quad \text{para condições} \\ \text{intermediárias} \dots\dots \text{Eq. 31}$$

onde:  $a_0$  e  $a_1$  são constantes determinadas por regressão linear.

Os métodos empíricos para quantificar a resistência ao rolamento de um trator convencional foram objeto de estudo por DRAGHI & JORAJUARIA (1992). Os modelos estudados foram os de BRIXIUS (1987), GEE CLOUGH et al. (1978) e McALLISTER (1983). O modelo de McALLISTER (1983) foi o que apresentou um ajuste melhor com o valor da resistência ao rolamento medido experimentalmente em três condições de solo. Nesse mesmo trabalho foi analisada a influência da velocidade de deslocamento sobre a resistência ao rolamento. Nas velocidades de 0,78 e 2,28 m/s (2,8 e 8,2 km/h) verificou-se, uma influência significativa da velocidade para as três condições de solo.

HILBERT et al. (1992) estudaram a resistência ao rolamento de um mesmo modelo de trator na configuração convencional e tração auxiliar numa mesma condição de solo e para 4 velocidades distintas: 1,67; 1,94; 2,22 e 2,50 m/s (6, 7, 8 e 9 km/h). Os valores de resistência ao rolamento encontrados foram significativamente diferentes entre as configurações sendo o convencional superior ao de tração auxiliar. Não foram encontradas diferenças significativas na resistência ao rolamento e nem na potência de rolamento nas velocidades estudadas. A comparação dos resultados com os modelos propostos por BRIXIUS (1987), GEE CLOUGH et al. (1978) e McALLISTER (1983), não foram satisfatórios.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material

O material utilizado nesta dissertação abrange a área experimental, os tratores de tração e de frenagem, pneumáticos submetidos ao ensaio, uma carreta tanque, os equipamentos de medição dos parâmetros envolvidos no trabalho e uma balança de plataforma.

##### 3.1.1. Área Experimental

O presente trabalho foi executado no município de Piracicaba, (SP), na Fazenda Areão, pertencente as áreas experimentais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo.

O solo é classificado como um podzólico vermelho-escuro latossólico endoálico, horizonte A moderado, textura argilosa (PELa)<sup>6</sup>.

Para os ensaios delimitou-se uma área em terraços de superfície plana e de características homogêneas. Os terraços apresentam formato retangular com dimensões aproximadas de 20m de largura e 150m de comprimento.

---

6 SPAROVEK, G.; TERAMOTO, E.R.; TORETA, D.M.; ROCHELE, T.C.P.; SHAYER, E.P.M. Erosão simulada e a produtividade da cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas. 15:363-68. 1991.

O solo foi preparado por meio de arado de disco e grade de discos recortados para a incorporação do material de cobertura.

### 3.1.2. Tratores

Nos ensaios foram utilizados dois tratores nacionais de quatro rodas. O primeiro da marca Massey Ferguson, modelo 290/4 denominado trator de tração (Tt) e o segundo marca Valmet, modelo 128/4 denominado de trator de frenagem (Tf). As características técnicas de ambos os modelos utilizados durante o ensaio constam do Apêndice I. No Tt houve uma modificação nos seus acoplamentos originais, no engate de três pontos para que fosse evitada a transferência de peso do eixo dianteiro para o eixo traseiro da carreta tanque.

### 3.1.3. Pneumáticos

Foram utilizados neste trabalho 4 pneus iguais, novos e traseiros aplicados a tratores agrícolas, cujas características são apresentadas no Apêndice IV.

### 3.1.4. Carreta Tanque

Para execução dos ensaios foi construída uma carreta tanque de dois eixos com a finalidade de aplicar carga sobre os pneus. A sua lastragem foi feita considerada com o tanque vazio, totalmente cheio de água e através de sacos com gesso de peso conhecido. Os sacos foram distribuídos uniformemente em duas abas laterais soldadas ao tanque. Com isto, ficou estabelecido uma distribuição uniforme de carga por eixo e por pneu. Essa

distribuição foi verificada na balança de plataforma antes do início dos ensaios. O apêndice II apresenta uma descrição técnica e um esquema da carreta tanque com suas principais dimensões.

### 3.1.5. Equipamentos de Medição

#### 3.1.5.1. - Medição de força e velocidade

A medição da força de resistência ao rolamento e da velocidade de deslocamento da carreta tanque, foram realizadas através de:

- a) Célula de carga com capacidade 49 kN, marca KYOWA, tipo LV-5TE, com unidade transdutora extensométrica, para determinação da força.
- b) Amplificador dinâmico, marca KYOWA, modelo DPM-6G, com 6 canais, equipado com monitor tipo galvanômetro de ponteiro.
- c) Conversor de tensão em frequência (conversor analógico/digital - AID).
- d) Conjunto odométrico, constituído de roda odométrica e um dispositivo composto de sensor ótico e um disco perfurado com 60 orifícios localizados radial e simetricamente).
- e) Cronodômetro de fabricação própria (Departamento de Engenharia Rural - ESALQ/USP), constituído de três "displays". O primeiro para indicação do número de pulsos emitidos por um sensor ótico localizado no conjunto odométrico. O segundo para indicação do número de

pulsos emitidos pelo conversor de tensão em frequência. O terceiro para indicação de tempo.

A descrição, as calibrações efetuadas e os detalhes de instalação dos equipamento constam do apêndice III.

#### **3.1.5.2. Medição de pressão**

O manômetro utilizado na calibração dos pneus é o de bourdon com fundo de escala igual a 500 kPa. Sua aferição foi executada numa bancada específica para essa finalidade através de um manômetro padrão

#### **3.1.6. Balança de Plataforma**

Balança digital de plataforma com registrador mecânico marca Toledo, com fundo de escala igual a 500 kN e escala de 50 N.

### **3.2. Métodos**

#### **3.2.1. Delineamento experimental**

Com esse trabalho procurou-se estudar a influência das variáveis velocidade, pressão de insuflagem e carga dinâmica sobre os pneus, na força de resistência ao rolamento. Por se tratar de um experimento onde se pretende estudar as interações simultâneas e individuais dos fatores envolvidos, optou-se por um delineamento experimental inteiramente casualizado com fatorial

5x3x3x5, referentes ao número de repetições, velocidades, pressões de insuflagem e cargas dinâmicas sobre o pneu, respectivamente.

### 3.2.2. Programação dos ensaios

Os ensaios, visando avaliar a força de resistência ao rolamento, incluíram os seguintes valores para as variáveis:

a) Velocidade

$$V_1 = 1,33 \text{ m/s (4,78 km/h)}$$

$$V_2 = 1,92 \text{ m/s (6,91 km/h)}$$

$$V_3 = 3,07 \text{ m/s (11,10 km/h)}$$

b) Pressão de insuflagem

$$P_1 = 110 \text{ kPa (16 p.s.i.)}$$

$$P_2 = 152 \text{ kPa (22 p.s.i.)}$$

$$P_3 = 193 \text{ kPa (28 p.s.i.)}$$

c) Carga aplicada sobre o pneu

$$L_2 = 9,3 \text{ kN}$$

$$L_4 = 11,3 \text{ kN}$$

$$L_1 = 13,5 \text{ kN}$$

$$L_3 = 16,5 \text{ kN}$$

$$L_5 = 19,4 \text{ kN}$$

As velocidades de deslocamento selecionadas para os ensaios foram determinadas em função da utilização dos pneumáticos em operações agrícolas. Na faixa de 1,3 à 3,0 m/s encontram-se a maioria das operações que exigem um grande requerimento de potência, tais como a aração, gradeação e subsolagem entre outras. As velocidades foram obtidas nos ensaios pela combinação da rotação do motor e

relação de transmissão dada pela caixa de mudança de marcha.

Para a pressão de insuflagem adotou-se o limite inferior e superior especificado pelo fabricante do pneu. Devido a amplitude deste intervalo, adotou-se um valor intermediário entre os limites.

As condições de lastro para os pneus foram determinadas em função da carga máxima admissível no pneu e da condição de estabilidade longitudinal operacional do trator. Essa última condição preconiza que a carga sobre o eixo dianteiro de um trator não deve ser menor que 20% do peso total. Em função desses fatores foram escolhidas as 5 condições de lastro.

### **3.2.3. Determinação da resistência ao rolamento**

A força de resistência ao rolamento por pneu foi obtida pela divisão da força medida pela célula de carga durante os ensaios por quatro. Justifica-se esta divisão devido às condições de lastragem iguais nos pneus conforme já descrito em 3.1.4.

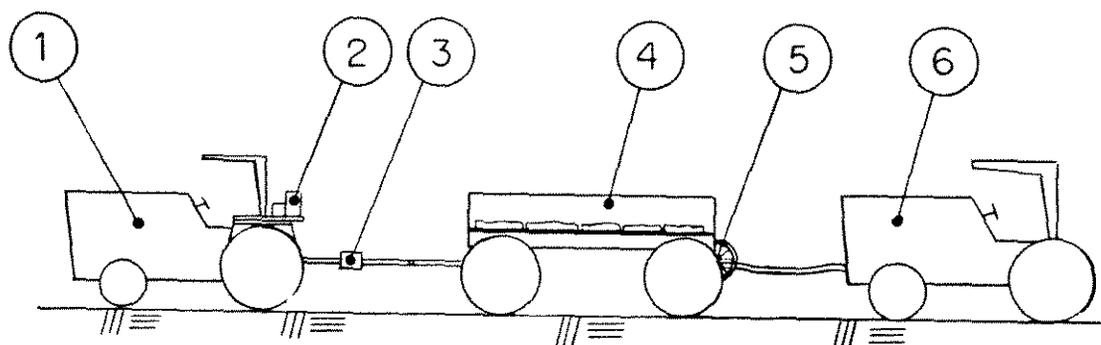
A resistência ao rolamento média por repetição foi obtida por integração dos dados de pulsos elétricos proporcionais a força e tempo, ambos lidos no cronodômetro. Esses valores lidos foram colocados na equação de calibração Eq. III-3. Ver apêndice III, para maiores detalhes.

### **3.2.4. Metodologia dos ensaios**

#### **3.2.4.1. Comboio de ensaio**

O trator de tração, a carreta tanque, o

trator de frenagem e os equipamentos de medição utilizados formam um conjunto aqui denominado de comboio de ensaio. A disposição dos elementos pode ser visualizada na Figura 6.



**Figura 6 - Comboio de Ensaio.**

- |                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| 1. Trator de tração;              | 4. Carreta tanque;     |
| 2. Sistema de aquisição de dados; | 5. Roda odométrica;    |
| 3. Célula de carga;               | 6. Trator de frenagem; |

#### 3.2.4.2. Execução dos ensaios

A cada ensaio executado foram lidos no cronodômetro três parâmetros: tempo do ensaio, pulso da roda odométrica e pulsos de força provenientes da célula de carga. Devido ao grande número de ensaios, elaborou-se uma planilha de campo com a finalidade de facilitar o posterior manuseio. Essa planilha pode ser observada na Figura 7. No Apêndice III a forma de aquisição de dados é descrita detalhadamente.

NUMERO DO ENSAIO	CODIGO DO ENSAIO	TEMPO DA REPETICAO					PULSOS DA RODA			PULSOS PROPORCIO-				
		(2) $T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	(3) $PRO_1$	...	$PRO_5$	(4) $PF_1$	$PF_2$	$PF_3$	$PF_4$	$PF_5$
1														
2														
45														

Figura 7 - Planilha de campo.

- 1 - XYZ → código do ensaio  
 X → condição de lastro dos pneus (1-L<sub>1</sub>; 2-L<sub>2</sub>; 3-L<sub>3</sub>; 4-L<sub>4</sub>; 5-L<sub>5</sub>)  
 Y → velocidade de deslocamento (1-V<sub>1</sub>; 2-V<sub>2</sub>; 3-V<sub>3</sub>)  
 Z → pressão de insuflagem do pneu (1-P<sub>1</sub>; 2-P<sub>2</sub>; 3-P<sub>3</sub>)
- 2 - T<sub>n</sub> → tempo da repetição n do ensaio XYZ
- 3 - PRO<sub>n</sub> → pulsos da roda odométrica na repetição n do ensaio XYZ
- 4 - PF<sub>n</sub> → pulsos de força na repetição n do ensaio XYZ.

Na escolha da ordem dos ensaios levou-se em consideração a dificuldade em se variar cada um dos parâmetros, isto é, para uma mesma pressão de insuflagem e carga sobre o pneu, executou-se as cinco repetições para todas as velocidades. Em seguida para a mesma pressão de

insuflagem mudou-se a carga sobre o pneu executando-se as cinco repetições para todas as velocidades e assim sucessivamente até a última pressão de insuflagem.

Através da planilha de campo selecionou-se um ensaio, procedeu-se a calibração dos pneus e carregou-se a carreta tanque para a respectiva condição de lastro. Em seguida selecionou-se a marcha e fixou-se a rotação do motor para obter-se a velocidade de deslocamento. Iniciou-se então o tracionamento da carreta tanque. Após a estabilização da velocidade a aquisição de dados foi iniciada por um tempo aproximado de 30; 20 e 10s, respectivamente para as velocidades  $V_3$ ;  $V_2$  e  $V_1$ .

Encerrado o ensaio, o equipamento de aquisição de dados foi desligado e o trator de tração frenado lentamente. Devido a alta inércia da carreta tanque, ela foi frenada com o auxílio do trator de frenagem.

### 3.2.5. Metodologia para caracterização do solo

#### 3.2.5.1. Umidade

Foram executadas três determinações ao longo do dia de ensaio, cada uma contando de 10 (dez) amostras, retiradas na profundidade de 0-10 cm.

As amostras, acondicionadas em recipientes herméticos e previamente tarados, foram levadas ao laboratório e submetidos a secagem por 48 horas, em estufa, à 100-105°C. O teor de água na base seca.

Devido a homogeneidade da área de ensaio, fez-se uma média aritmética dos teores de umidade das amostras, obtendo-se assim o teor de água médio da área.

### 3.2.5.2. Granulometria

À partir das amostras de umidade, constitui-se uma amostra composta para caracterizar a textura do solo. A análise granulométrica foi realizada de acordo com o procedimento descrito por MEDINA (1975).

### 3.2.6. Metodologia estatística para análise e interpretação

A análise estatística foi feita através de um programa computacional específico para essa finalidade denominado "SANEST - Sistema de Análise Estatística".

Os resultados obtidos foram estudados através da análise de variância, utilizando-se o teste F ao nível de 5% de probabilidade para comparar médias dentro de cada fator ou interação entre fatores. O teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade foi utilizado para a comparação entre as médias dos fatores ou da interação de fatores. As médias encontradas foram ajustadas numa curva de regressão do primeiro grau.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização das condições de campo

A análise granulométrica do solo apresentou os seguintes resultados médios: Argila 58%, Areia 23% e Silte 19%.

O teor médio de água do solo durante os ensaios na camada de 0-15cm foi de 11% na base seca.

Os resultados de índice do cone obtidos por meio de um penetrógrafo manual, não apresentaram um comportamento físico que pudessem ser estudados e posteriormente utilizados na análise dos dados obtidos neste trabalho. Problemas de funcionamento no instrumento foram verificados após o encerramento dos ensaios, inviabilizando sua repetição por alterações climáticas do local. Com a finalidade de comparar os resultados obtidos de coeficiente de resistência ao rolamento neste trabalho com dados de literatura, optou-se pela utilização de um Índice do Cone de 700 kPa. Este índice segundo GEE-CLOUGH (1980) representa uma condição média de uma grande faixa de tipo, resistência, conteúdo de umidade e condições de superfície do solo.

### 4.2. Dados obtidos

A partir dos dados da planilha de campo, item 3.2.4.2., e das equações para o cálculo da velocidade

e calibração da célula de carga, Apêndice III, elaborou-se a planilha de resultados da resistência ao rolamento e velocidade para todos os tratamentos, conforme está mostrado no apêndice V.

#### 4.3. Análise de variância dos dados

À partir dos resultados do Apêndice IV, realizou-se a análise de variância da resistência ao rolamento para o delineamento experimental em função de lastro, pressão de insuflagem, velocidade e interações entre as variáveis que é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Análise de variância dos dados.

CAUSAS DA VARIACÃO	G. L.	S. Q.	Q. M.	VALOR F	PROB. > F
LASTRO	4	8.9574447	2.2393612	529.4269	0.00001
PRESSÃO	2	0.1523859	0.0761930	18.0134	0.00001
VELOC.	2	0.4261000	0.2130500	50.3690	0.00001
LAS*PRE	8	0.3514937	0.0439367	10.3875	0.00001
PRE*VEL	8	0.0543790	0.0067974	1.6070	0.12502
LAS*PRE*VEL	16	0.5071343	0.0316959	7.4935	0.00001
RESIDUO	180	0.7613610	0.0042298		
TOTAL	224	11.3177792			

MÉDIA GERAL = 0.846401 kN

COEFICIENTE DE VARIACÃO = 7.684%

O lastro, a pressão de insuflagem, a velocidade e suas interações foram significativas ao nível de 1% de probabilidade ( $P < 0,01$ ), com exceção da interação lastro x velocidade. Essa análise indica suas influências na resistência ao rolamento. Com base no

apresentado, desenvolveu-se uma análise individual de lastro, pressão de insuflagem, velocidade e suas interações através do Teste de Tukey ao nível de 5% para todos os tratamentos.

#### 4.4. Análise individual dos fatores na resistência ao rolamento

##### 4.4.1. Lastro

A Tabela 3 apresenta os resultados do fator lastro analisados pelo Teste de Tukey a nível de 5%. Essa mesma tabela mostra a variação do coeficiente de resistência ao rolamento.

Tabela 3 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento em kN, do pneu 18.4/34, para o fator lastro e o coeficiente de resistência ao rolamento ( $C_{RR}$ ).

LASTRO (kN)	$L_2 = 9,3$	$L_4 = 11,3$	$L_1 = 13,5$	$L_3 = 16,5$	$L_5 = 19,4$
RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO (kN)	0,59e <sup>(1)</sup>	0,69d	0,83 c	0,98b	1,15a
$C_{RR}$ (%)	6,3	6,1	6,2	5,9	5,9

(1) as letras referem-se a comparação do fator lastro.

As médias de resistência ao rolamento para as condições de lastro de 9,3; 11,3; 13,5; 16,5 e 19,4 kN, diferem entre si de forma significativa, mostrando a

influência da variável lastro na resistência ao rolamento. Com esses valores médios ajustou-se um modelo empírico que é apresentado na Figura 8.

A variável lastro foi o principal fator na alteração da resistência ao rolamento. Os resultados encontrados mostram um aumento da resistência ao rolamento do pneu, de 0,56 kN para um aumento da carga aplicada de 10,1 kN. Esse fato pode ser explicado por um aumento da pressão na área de contato do pneu-solo causando um maior afundamento. Esse comportamento está de acordo com dados levantados e os modelos empíricos desenvolvidos por outros autores tais como: DWYER & FEBO (1987), RUMMER & ASHMORE (1985); GEE-CLOUGHT (1980) e KUCERA & JAMISON (1965).

A forte dependência linear observada entre a resistência ao rolamento e o lastro permite representar essa dependência através do coeficiente angular ou coeficiente de resistência ao rolamento tradicionalmente utilizado para modelos desse tipo.

O coeficiente de resistência ao rolamento variou de 6,3% à 5,9% na faixa de lastro de 9,3 à 19,4 kN. Os valores do coeficiente de resistência ao rolamento obtidos foram comparados com valores de literatura como pode ser observado na Tabela 4, para um índice de Cone de 700 kPa.

Através dos dados da Tabela 4 pode-se observar que o coeficiente de resistência ao rolamento obtido nos ensaios é menor do que dos modelos empíricos utilizados. Essa diferença pode se dar pela situação do rodado através da qual os ensaios foram conduzidos. Nos modelos empíricos os rodados eram autopropelidos enquanto que neste trabalho os rodados eram rebocados. Essa diferença de situação do rodado faz com que no autopropelido tenha um volume de solo solto maior para deslocar à sua frente causando um aumento na resistência ao rolamento.

**Tabela 4.** Comparação do Coeficiente de Resistência ao Rolamento (%) obtido nos ensaios com os modelos empíricos.

(1) GEE-CLOUGH (1980); (2) DWYER et al. (1976) e (3) WISMER & LUTH (1974).

LASTRO (kN)	9,3	11,3	13,5	16,5	19,4
Valor Obtido	6,3	6,1	6,2	5,9	5,9
Modelo Empírico (1)	7,5	7,1	7,1	7,2	7,3
Modelo Empírico (2)	8,8	8,6	8,5	8,6	8,7
Modelo Empírico (3)	6,1	6,5	7,0	7,6	8,3

O pneu rebocado opera com velocidade angular inferior à sua correspondente com raio estático devido ao patinamento negativo a que fica submetido. Nessas condições a tendência de afundamento do pneu é menor que no caso de rodas tratoras ou autopropelidas onde o patinamento positivo desloca camadas de solo da área de contacto para a parte posterior do pneu, o que promove o seu afundamento no solo. Essa maior profundidade de operação leva associado um maior esforço para a movimentação do solo na direção horizontal o que justifica a maior resistência ao rolamento do pneu acoplado a árvore motriz, conforme descrito por YONG et al. (1984).

O modelo ajustado foi o linear apresentado na figura 8, mostrando uma boa correlação com os dados obtidos ( $R^2 = 0,99$ ). A tendência de linearidade do aumento da resistência ao rolamento em função da lastragem também foi observada por KOOLEN & KUIPERS (1983) e KUCERA & JAMISON (1965). Através do modelo ajustado encontrou-se um coeficiente de resistência ao rolamento de 5,5%. KUCERA &

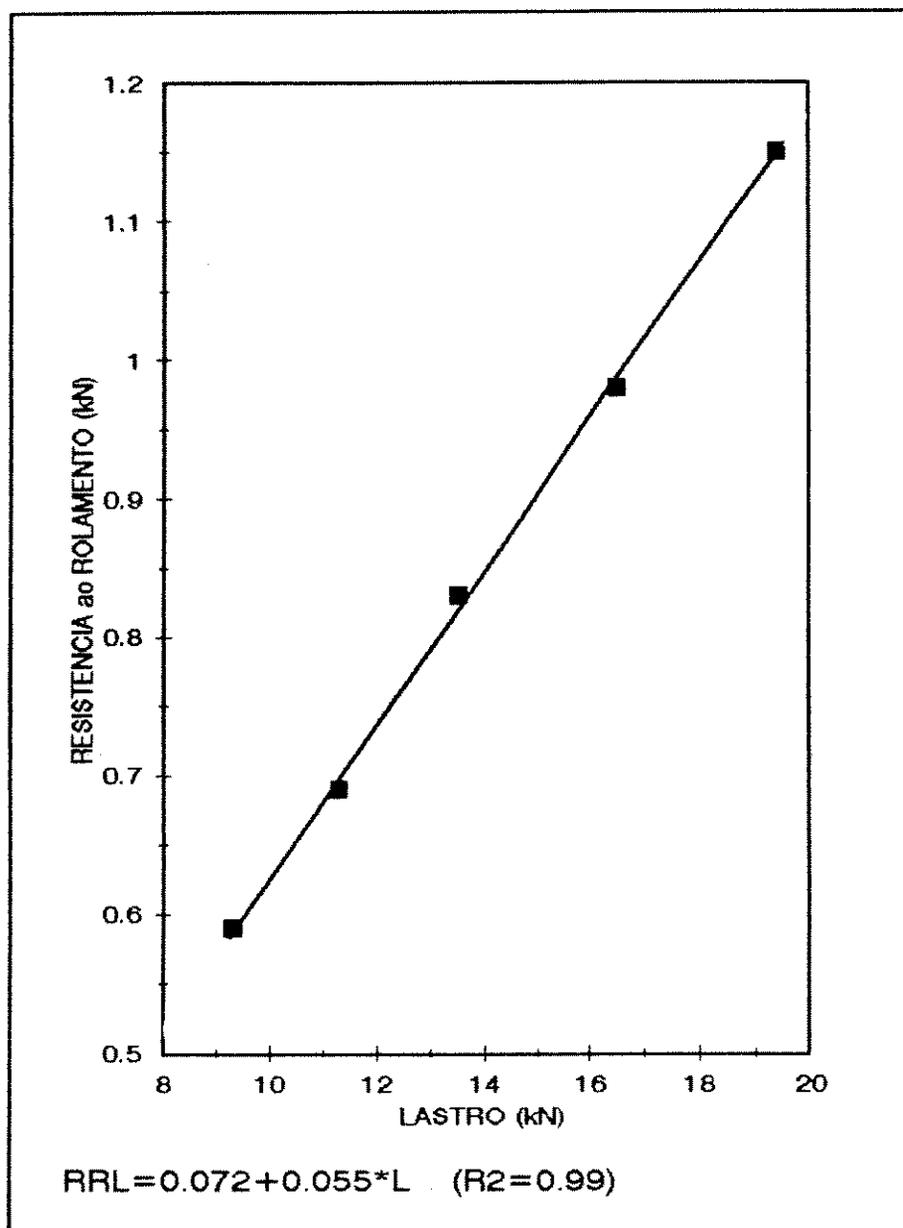


Figura 8 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34 em função do lastro, em kN.

coeficiente de resistência ao rolamento de 5,5%. KUCERA & JAMISON (1965) encontraram coeficiente de resistência ao rolamento de 24% para rodado pneumático dianteiro de tratores convencionais.

#### 4.4.2. Pressão de insuflagem

A Tabela 5 apresenta os resultados do fator pressão de insuflagem analisados pelo Teste de Tukey, a nível de 5%.

Tabela 5 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, para a variável pressão de insuflagem, em kPa.

PRESSÃO DE INSUFLAGEM (kPa)	110	152	193
RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO (kN)	0,81 <sub>c</sub> <sup>(1)</sup>	0,85 <sub>b</sub>	0,88 <sub>a</sub>

(1) as letras referem-se a comparação do fator pressão de insuflagem.

Conforme se observa as médias de resistência ao rolamento nas pressões de insuflagem de 110; 152 e 193 kPa, diferem entre si de forma significativa. A porcentagem de aumento da resistência ao rolamento entre níveis extremos de pressão de insuflagem (110 e 193 kPa) foi de 9%.

Os resultados encontrados mostram um aumento na resistência ao rolamento do pneu com o aumento da sua pressão de insuflagem na proporção de 0,07 kN para

83 kPa respectivamente. Esse fato pode ser atribuído pela diminuição na área de contacto pneu-solo, implicando em maior pressão de contacto e conseqüentemente maior afundamento. Esse comportamento está de acordo com dados levantados por outros autores, tais como, MCKIBBEN & DAVIDSON (1940a) e HASSAN & SIROIS (1985).

Com os valores médios ajustou-se um modelo empírico. O modelo ajustado foi o linear, Figura 9 apresentando uma boa correlação com os dados obtidos ( $R^2 = 0,97$ ).

#### 4.4.3. Velocidade

A fixação da rotação do motor e da relação de transmissão durante os ensaios tem por finalidade manter uma velocidade constante de deslocamento do conjunto. As imperfeições na superfície podem causar uma variação na velocidade.

Como um dos objetivos deste trabalho é de estudar a influência desse fator na resistência ao rolamento, efetuou-se uma análise estatística para as três velocidades,  $V_1$ ;  $V_2$  e  $V_3$  que pode ser observada na Tabela 6.

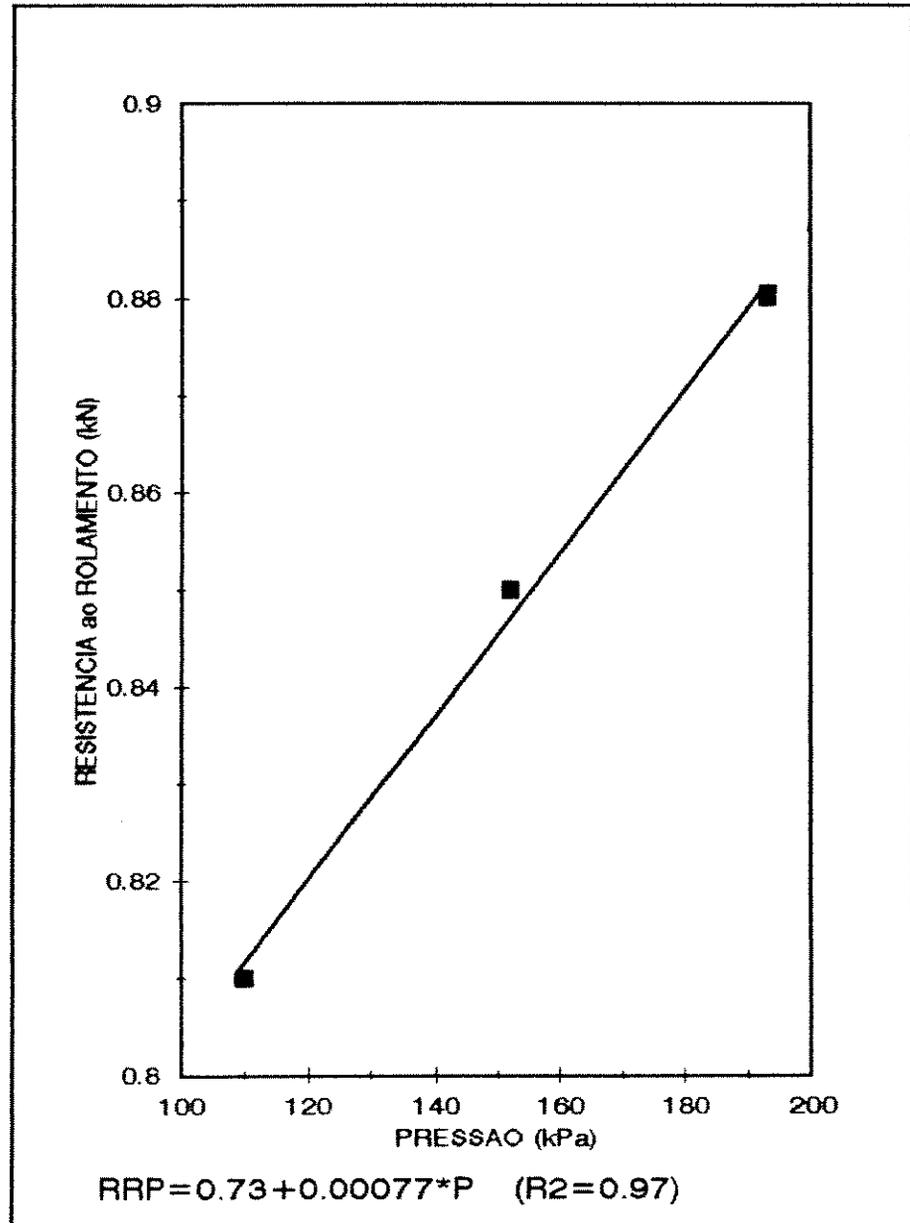


Figura 9 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34 em função da pressão de insuflação, em kPa.

Tabela 6 - Análise estatística fixando os níveis do fator velocidade em  $V_1$ ;  $V_2$  e  $V_3$ .

ESTATÍSTICAS	$V_1$	$V_2$	$V_3$
NÚMERO DE OBSERVAÇÕES	75	75	75
VALOR MÍNIMO (m/s)	1,24	1,84	2,86
VALOR MÁXIMO (m/s)	1,45	1,97	3,24
MÉDIA (m/s)	1,33	1,92	3,07
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	2,19	1,37	2,63

Os coeficientes de variação encontrados na análise estatística foram 2,19; 1,37 e 2,63%, respectivamente para  $V_1$ ;  $V_2$  e  $V_3$ . Pela pequena variabilidade dos dados, optou-se pela adoção das seguintes médias obtidas:  $V_1 = 1,33$ ;  $V_2 = 1,92$  e  $V_3 = 3,07$  m/s.

A Tabela 7 apresenta os resultados da variável velocidade analisados pelo Teste de Tukey, a nível de 5%.

Tabela 7 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, para a variável velocidade, em m/s.

VELOCIDADE (m/s)	$V_1 = 1,33$	$V_2 = 1,92$	$V_3 = 3,07$
RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO (kN)	0,79c <sup>(1)</sup>	0,86b	0,89a

(1) as letras referem-se a comparação do fator velocidade.

Conforme se observa as médias de resistência ao rolamento nos três níveis de velocidade, diferem entre si de forma significativa. O aumento na resistência ao rolamento entre os extremos do fator velocidade (1,33 e 3,07 m/s) foi de 13%.

Os resultados obtidos indicam um aumento da resistência ao rolamento do pneu com o aumento da velocidade, mas essa tendência causa controvérsia na literatura.

POPE (1971) utilizando-se de rodados metálicos operando a baixas velocidades (menores do que 0,08 m/s), não encontrou uma relação entre as velocidades e a resistência ao rolamento. A mesma conclusão foi obtida por HILBERT et al. (1992), trabalhando com rodados pneumáticos operando as velocidades de 1,67; 1,94; 2,22 e 2,50 m/s.

WOERMAN & BASHFORD (1984) e DRAGHI e JORAJUARIA (1992) encontraram resultados que coincidem com o comportamento obtido neste trabalho, operando com pneumáticos nas velocidades de 1,11 e 2,44 m/s; 0,78 e 2,28 respectivamente.

A massa de solo deslocada lateralmente no rastro deixado pelo pneu absorve energia cinética. A maior energia conferida as partículas do solo nas velocidades mais altas, demandam um esforço adicional que justifica o aumento da resistência ao rolamento.

O modelo empírico linear ajustado, mostrado na figura 10, pretende apenas apresentar um valor médio de aumento da resistência ao rolamento com a velocidade através do coeficiente angular de 0,0542 kN/(m/s). Esse valor pode ser considerado um bom indicador em função do coeficiente de correlação obtido ( $R^2 = 0,81$ ).

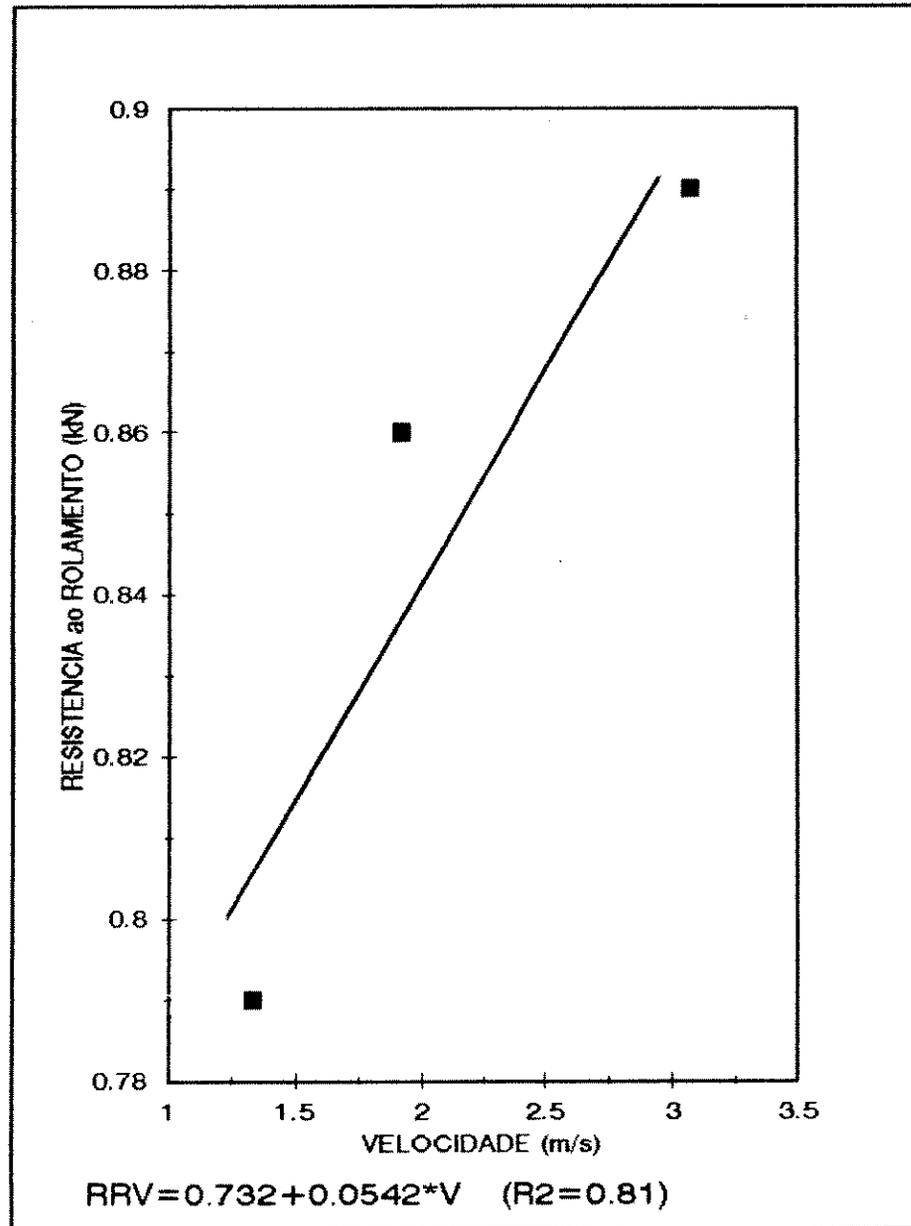


Figura 10 - Gráfico da resistência ao rolamento em kN, do pneu 18.4/34, em função da velocidade, em m/s.

#### 4.4.4. Lastro-Pressão de Insuflagem

A Tabela 8 apresenta os resultados da interação lastro/pressão de insuflagem analisados pelo Teste de Tukey, a nível de 5%.

Tabela 8 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, para o pneu 18.4/34 dentro de (110; 152 e 193 kPa), da variável pressão de insuflagem e (9,3; 11,3; 13,5; 16,5 e 19,4 kN) da variável lastro.

PRESSÃO DE INSUFLAGEM		$P_1 = 110$	$P_2 = 152$	$P_3 = 193$			
L A S T R O  (kN)	$L_5 = 19.4$	1,14	<sup>(1)</sup> <sub>a</sub> A <sup>(2)</sup>	1,13	a A	1,17	a A
	$L_3 = 16.5$	0,91	b B	0,93	b B	1,10	a B
	$L_1 = 13.5$	0,78	b c	0,85	a c	0,86	a c
	$L_4 = 11.3$	0,63	b D	0,71	a D	0,73	a D
	$L_2 = 9.3$	0,61	a D	0,61	a E	0,54	b E

(1) as letras minúsculas referem-se a comparação de pressão de insuflagem dentro de cada nível da variável lastro.

(2) as letras maiúsculas referem-se a comparação da variável lastro dentro de cada nível de pressão de insuflagem.

Conforme se observa na Tabela 8, as médias de resistência ao rolamento do fator pressão de insuflagem dentro dos cinco níveis de lastro, aumentou com o aumento

da pressão de insuflagem nos níveis 11,3; 13,5 e 16,5 kN. No nível 19,4 kN, esse comportamento apenas mostra uma mesma tendência visto que para os três níveis de pressão de insuflagem não existiu diferença significativa entre os valores de resistência ao rolamento. O comportamento observado para o nível de lastro de 9,3 kN não condiz com os outros níveis podendo ter existido problemas no nível de pressão de 193 kPa.

Com os valores médios de resistência ao rolamento do fator pressão de insuflagem dentro de cada nível de lastro de insuflagem ajustou-se um modelo empírico que é apresentado na Figura 11.

Os modelos ajustado para os níveis de lastro de 11,3; 13,5 e 16,5 kN foram lineares cujas equações e coeficientes de correlação encontrados foram:

- Para o  $L_4 = 11,3$  kN  $\rightarrow RRL_4 = 0,518 + 0,00113P$  ( $R^2 = 0,89$ )
- Para o  $L_1 = 13,5$  kN  $\rightarrow RRL_1 = 0,696 + 0,00089P$  ( $R^2 = 0,81$ )
- Para o  $L_9 = 16,5$  kN  $\rightarrow RRL_9 = 0,640 + 0,00223P$  ( $R^2 = 0,81$ )

Para a condição de lastro  $L_4$  (11,3 kN) obteve-se um acréscimo na resistência ao rolamento de 1,13 N para um aumento na pressão de insuflagem de 1 kPa. Para a condição de lastro  $L_1$  (13,5 kN) obteve-se um acréscimo na resistência ao rolamento de 0,89 N para um aumento na pressão de insuflagem de 1 kPa. Para a condição de lastro  $L_9$  (16,5 kN) obteve-se um acréscimo na resistência ao rolamento de 2,23 N para um aumento da pressão de insuflagem de 1 kPa.

Conforme se observa na Tabela 8, as médias de resistência ao rolamento do fator lastro dentro do fator pressão de insuflagem indicam que para os níveis de 152 e 193 kPa de pressão de insuflagem existiu uma diferença significativa entre todos os níveis de lastro. Pode-se observar também o comportamento de crescimento da resistência ao rolamento com aumento do lastro para todos

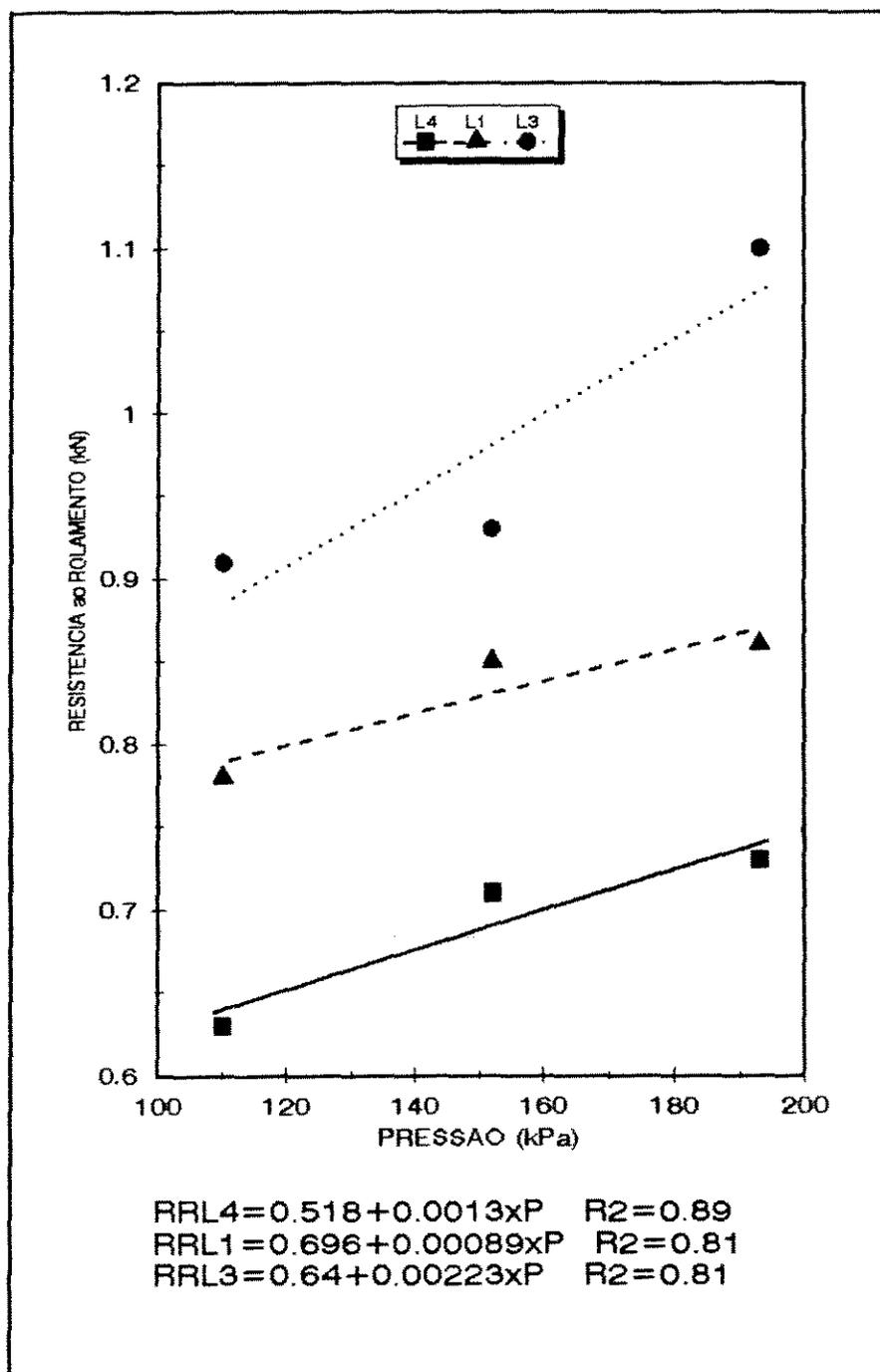


Figura 11 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função da pressão de insuflação, em kPa, para três níveis de lastro, em kN.

os níveis de pressão de insuflagem.

Com os valores das médias, ajustou-se um modelo empírico que está representado na Figura 12.

O modelo ajustado para os três níveis de pressão de insuflagem foi o linear, cujas equações e coeficientes de correlação encontrados foram:

- Para a pressão de insuflagem  $P_1 = 110$  kPa  $\rightarrow$   
 $RRP_1 = 0,073 + 0,05299 \cdot L$  ( $R^2 = 0,97$ )
- Para a pressão de insuflagem  $P_2 = 152$  kPa  $\rightarrow$   
 $RRP_2 = 0,155 + 0,04933 \cdot L$  ( $R^2 = 0,98$ )
- Para a pressão de insuflagem  $P_3 = 193$  kPa  $\rightarrow$   
 $RRP_3 = - 0,011 + 0,06354 \cdot L$  ( $R^2 = 0,97$ )

Para a condição de pressão de insuflagem  $P_1 = 110$  kPa, o coeficiente de resistência ao rolamento obtido foi de 5,3%. Para a condição de pressão de insuflagem  $P_2 = 152$  kPa, o coeficiente de resistência ao rolamento obtido foi de 4,9%. Para a condição de pressão de insuflagem  $P_3 = 193$  kPa, o coeficiente de resistência ao rolamento obtido foi de 6,4%.

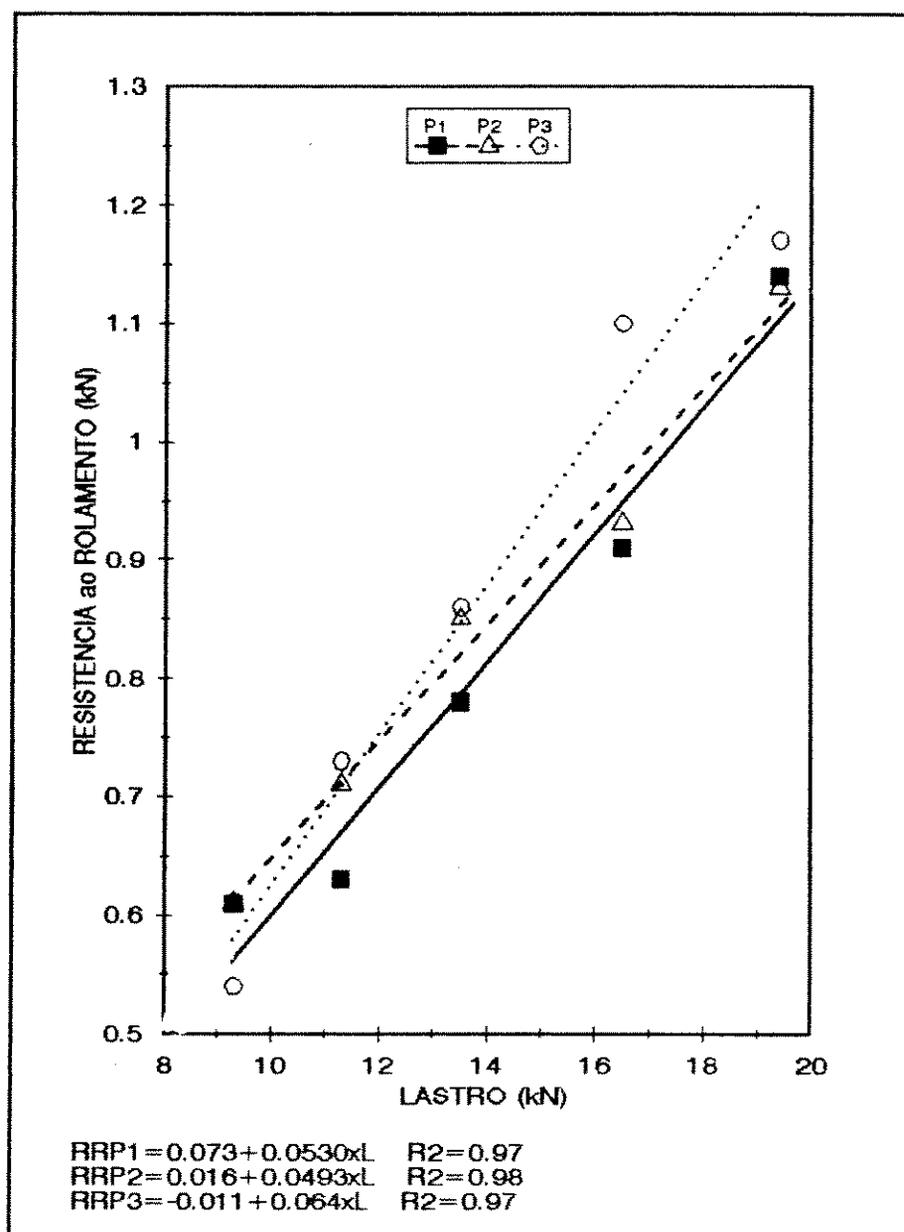


Figura 12 - Gráfico da Resistência ao Rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função do lastro, em kN, para os três níveis de pressão de insuflagem, em kPa.

#### 4.4.5. Lastro - Velocidade

A Tabela 9 apresenta os resultados da interação lastro-velocidade analisados pelo Teste de Tukey, a nível de 5%.

Tabela 9 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, para o pneu 18.4/34 dentro de (1,33; 1,92 e 3,07 m/s) do fator velocidade e (9,3; 11,3; 13,5; 16,5 e 19,4 kN) do fator lastro.

VELOCIDADE (m/s)		$V_1 = 1,33$	$V_2 = 1,92$	$V_3 = 3,07$	
L A S T R O  (kN)	$L_5 = 19,4$	1,11	$b^1$ 1,15	ab 1,18	a A
	$L_3 = 16,5$	0,91	b 1,01	a 1,01	a B
	$L_1 = 13,5$	0,75	b 0,86	a 0,89	a C
	$L_4 = 11,3$	0,66	b 0,70	ab 0,72	a D
	$L_2 = 9,3$	0,51	b 0,60	a 0,65	a E

(1) as letras minúsculas referem-se a comparação do fator velocidade dentro de cada nível do fator lastro.

(2) as letras maiúsculas referem-se a comparação do fator lastro dentro de cada nível do fator velocidade.

As médias de resistência ao rolamento, do fator velocidade dentro dos cinco níveis de lastro indicam que em nenhum dos níveis de lastro existiu uma diferença

significativa entre os três níveis de velocidade. Observa-se também que para todos os níveis de lastro existiu um aumento da resistência ao rolamento com a velocidade.

Com esses valores médios ajustou-se um modelo empírico que é apresentado na Figura 13.

Os modelos ajustados para os cinco níveis de lastro foram lineares cujas equações e coeficientes de correlação encontrados foram:

- Para o  $L_2 = 9,3 \text{ kN} \rightarrow RRL_2 = 0,428 + 0,0754V$  ( $R^2 = 0,88$ )
- Para o  $L_4 = 11,3 \text{ kN} \rightarrow RRL_4 = 0,626 + 0,0321V$  ( $R^2 = 0,87$ )
- Para o  $L_1 = 13,5 \text{ kN} \rightarrow RRL_1 = 0,680 + 0,0730V$  ( $R^2 = 0,77$ )
- Para o  $L_3 = 16,5 \text{ kN} \rightarrow RRL_3 = 0,872 + 0,0496V$  ( $R^2 = 0,58$ )
- Para o  $L_5 = 19,4 \text{ kN} \rightarrow RRL_5 = 1,07 + 0,0383V$  ( $R^2 = 0,93$ )

O aumento na resistência ao rolamento com a velocidade para as condições de lastro 9,3; 11,3; 13,5; 16,5 e 19,4 foi respectivamente de: 0,0754; 0,0321; 0,0496 e 0,0383 kN para uma variação na velocidade de 1 m/s.

Conforme se observa na Tabela 9, as médias de resistência ao rolamento do fator lastro dentro dos três níveis de velocidade, indicam que para os três níveis de velocidade existiu uma diferença significativa entre todos os níveis de lastro. Pode-se observar também o comportamento de crescimento da resistência ao rolamento com o aumento do lastro para todos os níveis de velocidade.

Com esses valores médios ajustou-se um modelo empírico que é representado na Figura 14.

O modelo ajustado para os três níveis de velocidade foi o linear, cujas equações e coeficientes de correlação encontrados foram:

- Para  $V_1 = 1,33 \text{ m/s} \rightarrow RRV_1 = -0,012 + 0,0571 L$  ( $R^2 = 0,99$ )
- Para  $V_2 = 1,92 \text{ m/s} \rightarrow RRV_2 = 0,090 + 0,0553 L$  ( $R^2 = 0,99$ )
- Para  $V_3 = 3,07 \text{ m/s} \rightarrow RRV_3 = 0,147 + 0,0531 L$  ( $R^2 = 0,99$ )

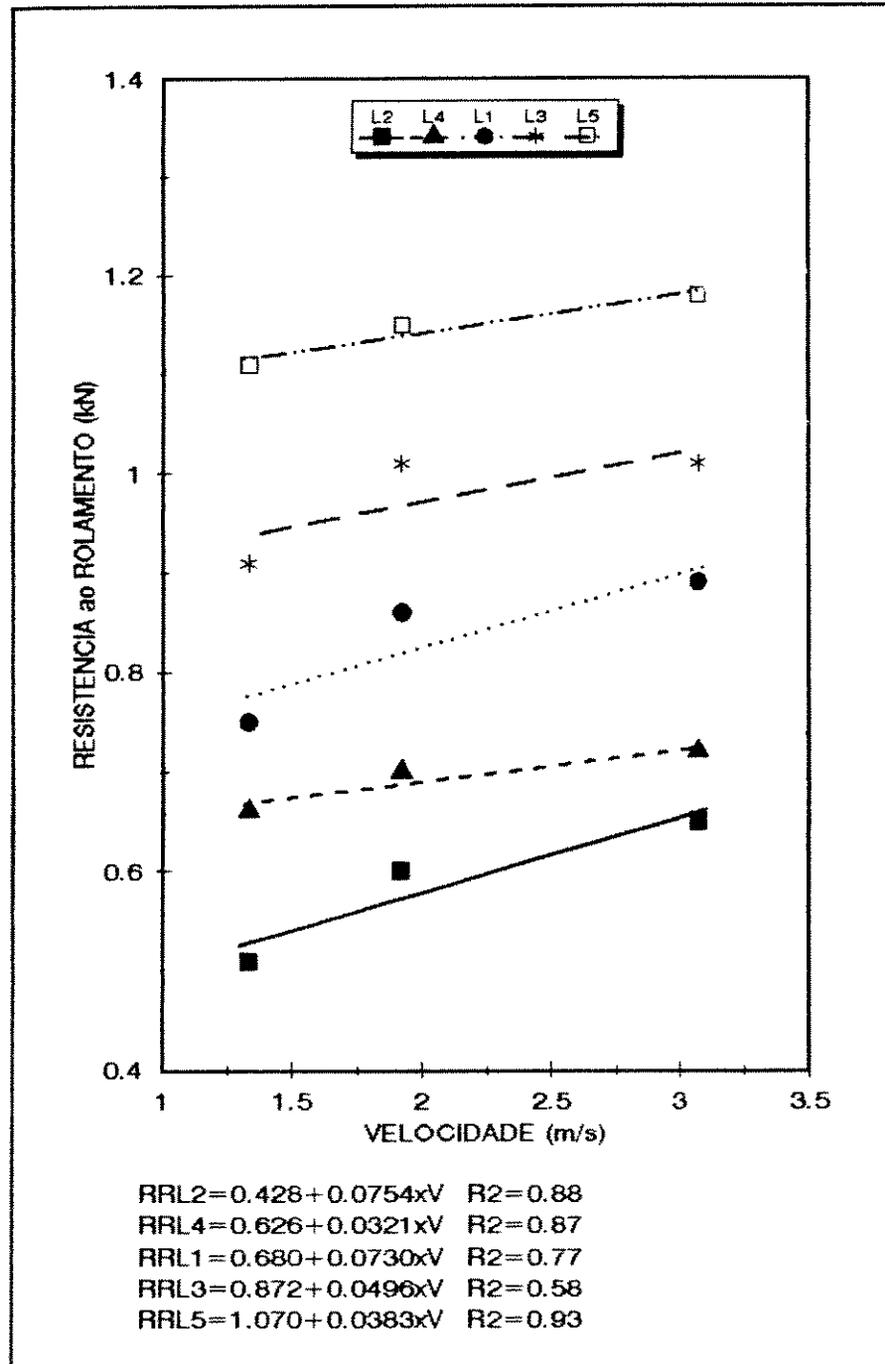


Figura 13 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função da velocidade, em m/s, para os cinco níveis de lastro, em kN.

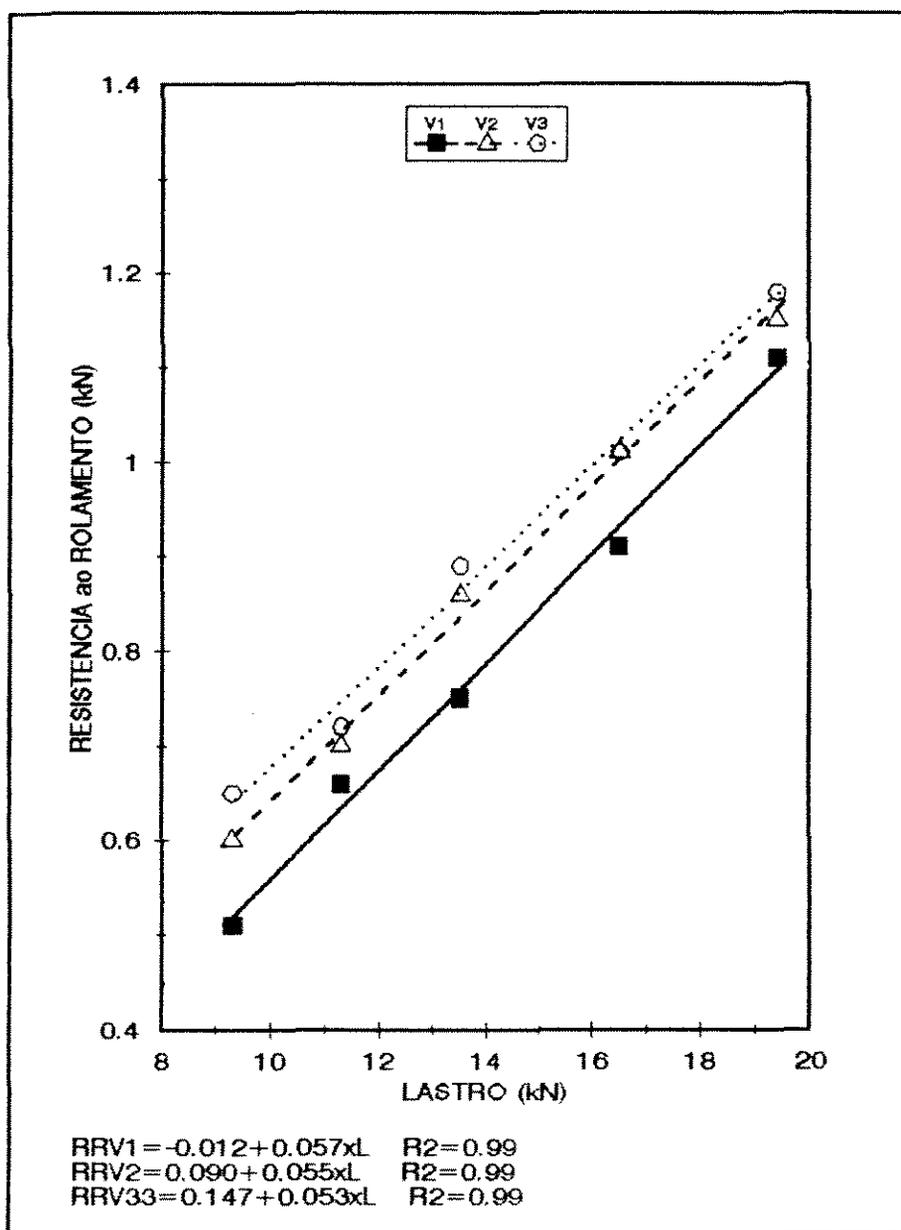


Figura 14 - Gráfico da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função do lastro, em kN, para os três níveis de velocidade, em m/s.

Para as condições de velocidade 1,33; 1,92 e 3,07 m/s, os coeficientes de resistência ao rolamento obtidos foram respectivamente: 5,7; 5,5 e 5,3%.

#### 4.4.6. Velocidade - Pressão de Insuflagem

A Tabela 10 apresenta os resultados da interação velocidade - pressão de insuflagem analisados pelo Teste de Tukey, a nível de 5%.

Tabela 10 - Teste de Tukey para médias de resistência ao rolamento, em kN, para o pneu 18.4/34 dentro de (110; 152 e 193 kPa) do fator pressão de insuflagem e (1,33; 1,92 e 3,07 m/s) do fator de velocidade.

PRESSÃO DE INSUFLAGEM (kPa)		$P_1 = 110$	$P_2 = 152$	$P_3 = 193$
VELOCIDADE m/s	$V_3 = 3,07$	0,89 a <sup>1</sup> A <sup>2</sup>	0,87 b A	0,91 a A
	$V_2 = 1,92$	0,81 c B	0,85 b AB	0,92 a A
	$V_1 = 1,33$	0,75 b C	0,82 a B	0,80 a B

(1) - as letras minúsculas referem-se a comparação do fator de pressão de insuflagem dentro de cada nível do fator velocidade.

(2) - as letras maiúsculas referem-se a comparação do fator velocidade dentro de cada nível do fator pressão de insuflagem.

Conforme se observa na Tabela 10 as médias de resistência ao rolamento do fator pressão de insuflagem dentro dos três níveis de velocidade, indicam que apenas no nível de 1,92 m/s, existiu uma diferença significativa entre os três níveis de pressão de insuflagem. Observa-se também uma tendência no aumento da resistência ao rolamento com a pressão de insuflagem para os três níveis de velocidade. A figura 15 mostra esses valores médios plotados. Devido ao número pequeno de níveis de pressão de insuflagem omitiu-se os modelos ajustados por apresentarem um baixo coeficiente de correlação.

Conforme se observa na Tabela 10, as médias de resistência ao rolamento do fator velocidade dentro dos três níveis de pressão de insuflagem indicam que apenas para o nível 110 kPa existiu uma diferença significativa entre os três níveis de velocidade. Pode-se observar também o comportamento de crescimento da resistência ao rolamento com o aumento da velocidade para os níveis 110 e 152 kPa. Para a pressão de 193 kPa, existe essa tendência de aumento mas o nível 1,92 m/s do fator velocidade não está coerente com o comportamento geral. A figura 16 mostra esses valores médios plotados. Devido ao pequeno número de níveis de velocidade omitiu-se os modelos ajustados.

#### 4.5. Equação empírica para estimar a resistência ao rolamento

Modelos empíricos do comportamento da resistência ao rolamento (RR) em função da pressão de insuflagem (P), lastro (L), e velocidade (V), foram obtidos através de regressões múltiplas.

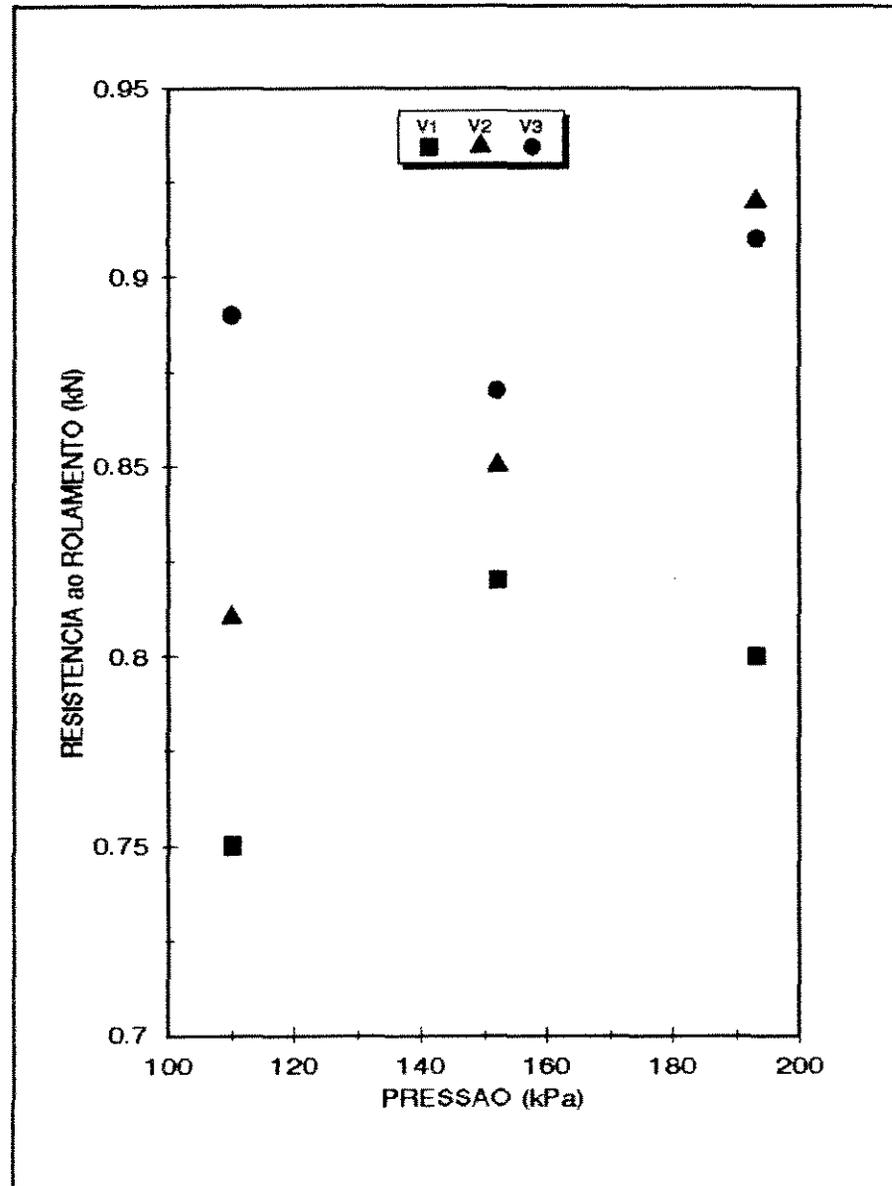


Figura 15 - Valores plotados da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função da pressão de insuflagem, em kPa, para os três níveis de velocidade, em m/s.

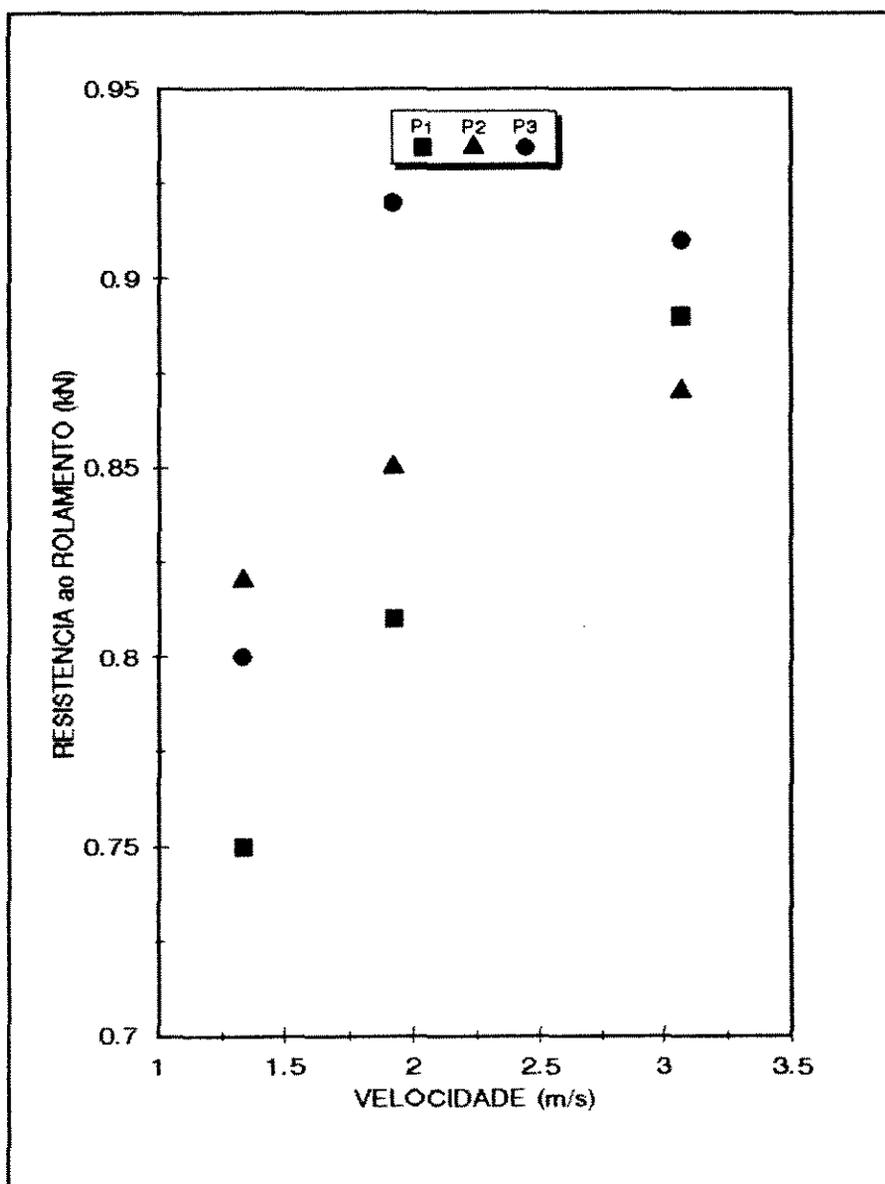


Figura 16 - Valores plotados da resistência ao rolamento, em kN, do pneu 18.4/34, em função da velocidade, em m/s, para os três níveis de pressão de insuflagem, em kPa.

Os modelos de regressões testados com seus coeficiente de correlação encontrados foram:

$$a) RR = a + b \cdot (V) + c \cdot (P) + d \cdot (L) \quad (R^2 = 0,83);$$

$$b) RR = e + f \cdot (V) + g \cdot (P) + h \cdot (L) + i \cdot (V \cdot P) + j \cdot (V \cdot L) + k \cdot (P \cdot L) + l \cdot (V \cdot P \cdot L) \quad (R^2 = 0,84);$$

$$c) RR = m + n \cdot (V) + o \cdot (P) + p \cdot (L) + q \cdot (V^2) + r \cdot (P^2) + s \cdot (L^2) + t \cdot (V \cdot P) + u \cdot (V \cdot L) + v \cdot (P \cdot L) \quad (R^2 = 0,85);$$

onde: a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, t, u e v são coeficientes constantes.

Dos três modelos testados optou-se pela escolha do modelo:

$$RR \text{ (kN)} = 0,162 + 0,0510 \cdot V \text{ (m/s)} + 0,000779 \cdot P \text{ (kPa)} + 0,0560 L \text{ (kN)};$$

que é o de mais fácil utilização visto que os coeficientes de correlação são muito próximos.

O modelo adotado é um passo importante no estudo da influência do lastro, pressão de insuflagem e velocidade na resistência ao rolamento.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Conclusões em relação aos parâmetros avaliados

Os resultados obtidos de resistência ao rolamento do pneu 18.4/34 na condição de solo preparado, conduzem as seguintes conclusões:

a) o parâmetro lastro mostrou ser o de maior influência na resistência ao rolamento. A resistência ao rolamento aumentou linearmente com o aumento do lastro sobre o pneu. O modelo ajustado aos dados foi:

$$RRL \text{ (kN)} = 0,072 + 0,055 \cdot L \text{ (kN)} \quad (R^2 = 0,99),$$

na faixa de 9,3 a 19,4 kN de lastro. Encontrou-se um coeficiente de resistência ao rolamento de 5,5%;

b) o parâmetro pressão de insuflagem mostrou ser o de menor influência na resistência ao rolamento. A resistência ao rolamento aumentou linearmente com o aumento da pressão de insuflagem. O modelo ajustado aos dados foi:

$$RRP \text{ (kN)} = 0,73 + 0,00077 \cdot P \text{ (kPa)} \quad (R^2 = 0,97),$$

na faixa de 110 a 193 kPa. Encontrou-se valores de resistência ao rolamento de 0,77 N para uma variação de 1 kPa na pressão de insuflagem;

c) o parâmetro velocidade mostrou ter uma influência próxima da pressão de insuflagem na resistência

ao rolamento. A resistência ao rolamento aumentou linearmente com o aumento da velocidade. O modelo ajustado aos dados foi:

$$RRV \text{ (kN)} = 0,732 + 0,0542 \cdot V \text{ (m/s)} \quad R^2 = 0,81,$$

na faixa de 1,33 a 3,07 m/s de velocidade. Encontrou-se valores de resistência ao rolamento ao redor de 54,2 N para uma variação na velocidade de 1 m/s.

O modelo empírico desenvolvido de modo a permitir estimar a resistência ao rolamento (RR) à partir dos intervalos avaliados das variáveis velocidade (V), pressão de insuflagem (P) e lastro (L) foi:

$$RR \text{ (kN)} = - 0,162 + 0,0510 \cdot V \text{ (m/s)} + 0,000779 \cdot P \text{ (kPa)} \\ + 0,0560 \cdot L \text{ (kN)}$$

## 5.2. Comentário geral

Novos trabalhos devem ser conduzidos com a finalidade de ensaiar outras configurações de pneus e condições de superfície, para avaliação do comportamento da resistência ao rolamento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRIGHT, E.H.; CLAAR II, P.W.; MARLEY, S.J. **Computer simulation of agricultural tractors.** St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1985. 26p. (ASAE Paper, 85-1023).
- ALCOCK, R. **Tractor implement systems.** Westport, Avi, 1986. 161p.
- ASAE (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS). **Soil sone penetrometer (S313.1).** In \_\_\_\_\_. **Agricultural engineers yearbook of standards 1983-84.** 13<sub>a</sub> ed. St. Joseph, 1983. p.233.
- ASHMORE, C.; BURT, E.C.; TURNER, J.L. **An empirical equation for predicting tractive performance of log-skides tires.** *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 30(5):1231-6, 1987.
- BEKKER, M.G. **Off-the-road locomotion; research and development in terramechanics.** Ann Arbor, University of Michigan Press, 1956. 220p.
- BEKKER, M.G. **Theory of land locomotion; the mechanics of vehicle mobility.** Ann Arbor, University of Michigan Press, 1962. 522p.

- BRIXIUS, W.W. Traction prediction equations for bias ply tires. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1987. 9p. (ASAE Paper, 87-1622).
- CHANG, C.-S. & COOPER, A.W. A study of the mechanics of tractor wheels. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1968. 20p. (ASAE Paper, 68-131).
- DRAGHI, L.M. & JORAJURIA, D. Ajuste a campo de ecuaciones predictivas de la resistencia a la rodadura de um tractor agrícola. Parte I - Influência de la velocidad de avance. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21.; SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DO CONESUL, 1., Santa Maria, 1992. Anais. Jaboticabal, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. v.3, p.1718-32.
- DWYER, M.J. & FEBO, P. Handbook of agricultural tyre performance. West Park, AFRC Institute of Engineering Research, 1987. 15p. (Report, 47).
- DWYER, M.J.; COMELY, D.R.; EVERNDEN, D.W. The development of a handbook of agricultural tyre performance. West Park, National Institute of Agricultural Engineering, 1974. 37p. (Departmental Note, DN/T/517/1415).
- GEE-CLOUGH, D. Selection of tyre sizes for agricultural vehicles. Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 25:261-78, 1980.
- HASSAN, A.E. & SIROIS, D.L. Traction and rolling resistance of a dual-tired skidder on wetland. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 28(4):1038-42, 1985.

- HILBERT, J.A.; BALBUENA, R.C.; CLAVERIE, J. Medición y predicción de la resistencia a la rodadura em tractores de tracción simple y tracción delantera asistida en laboreo secundario. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21; SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DO CONE SUL, 1., Santa Maria, 1992. Anais. Jaboticabal, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. v.3, p.1742-51.
- KOOLEN, A.J. & KUIPERS, H. Agricultural soil mechanics. Wageningen, Spring-Verlag, 1983. 241p.
- KRAVIG, K.K. Factors that effect the performance and efficiency of 4 WD tractors. St. Joseph, ASAE, 1986. 19p. (ASAE Paper, 86-1547).
- KUCERA, H.L. & JAMISON, W. Tractor-tire ballast compared. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 8(1):594-7, 1965.
- MACNAB, E.J.; WENSINK, R.B.; BOOSTER, D.E. Modeling wheel tractor energy requirements and tractive performance. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 20(4):602-9, July/Aug. 1977.
- McALLISTER, M. Reduction in the rolling resistance of tyres for trailed agricultural machinery. Journal of Agricultural Engineering Research, London, 28(2):127-37, Mar.1983.
- McKIBBEN, E.G. & DAVIDSON, J.B. Transport wheels for agricultural machines. II - Rolling resistance of individual wheels. Agricultural Engineering, St. Joseph, 20(12):469-73, 1940a.

McKIBBEN, E.G. & DAVIDSON, J.B. Transport wheels for agricultural machines. III - Effect of inflation pressure on the rolling resistance of pneumatic implement tires. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 21(1):25-6, 1940b.

McKIBBEN, E.G. & DAVIDSON, J.B. Transport wheels for agricultural machines. IV - Effect of outside and cross-section diameters on the rolling resistance of pneumatic implement tires. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 21(2):57-8, 1940c.

McKIBBEN, E.G. & DAVIDSON, J.B. Transport wheels for agricultural machines. V - Effect of wheel arrangement on Rolling Resistance. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 21(3):95-6, 1940d.

McKIBBEN, E.G. & DAVIDSON, J.B. Transport wheels for agricultural machines. VI - Effects of steel wheel rim shape and pneumatic tire tread design on rolling resistance. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 21(4):139-40, 1940e.

McKIBBEN, E.G. & HULL, D.O. Transport wheels for agricultural machines. VIII - Soil penetration tests as a means of predicting rolling resistance. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 21(6):231-4, 1940.

McKIBBEN, E.G. & THOMPSON, H.J. Transport wheels for agricultural machines. I - Comparative performance of steel wheels and pneumatic tires on two manure spreaders of the same model. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 20(11):419-22, 1939.

- MEDINA, H.P. & MONIZ, A.C., coord. *Elementos de pedologia*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1975. 460p.
- ONAFEKO, O. Analysis of the rolling resistance losses of wheels operating on deformable terrain. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, 14(2):176-82, 1969.
- PEDROLETTI, G. *I Pneumatici in agricoltura*. Bologna, Edagricole, 1988. 63p.
- POPE, R.G. The effect of wheel speed on rolling resistance. *Journal of Terramechanics*, Elmsford, 8(1):51-8, 1971.
- RAMSHAW, J. & WILLIAMS, T. *The rolling resistance of commercial vehicle tyres*. Crowthorne, Transport of the Engineering Division, of Transport, Transport and Road Research Laboratory, 1981. 43p. (TRRL Supplementary Report, 701).
- RUMMER, R. & ASHMORE, C. *Tractors affecting the rolling resistance of rubber-tired skidders*. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1985. 17p. (ASAE Paper, 85-1911).
- STADIE, A.L.; DAWSON, J.R.; NGUYEN, N.V. A comparison of the rolling resistance of single, tandem and dual wheels. *Agricultural Engineer*, Silsoe, 44(1):34-7, 1989.
- WANG, Z. & DOMIER, W. Prediction of drawbar performance for a tractor with dual tires. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 32(5):1529-33, 1989.

- WISMER, R.D. & LUTH, H.J. Off-road traction prediction wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, Elmsford, 10(2):49-61, 1973.
- WITNEY, B. *Choosing and using farm machines*. Singapura, Longman, 1988. 412p.
- WOERMAN, G.R. & BASHFORD, L.L. How much does front wheel assist really help? *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 65(4):31-5, Apr. 1984.
- YONG, R.N.; FATTAH, E.A.; SKIADAS, N. Analytical methods. In: \_\_\_\_\_. *Vehicle traction mechanics*. Amsterdam, Elsevier, 1984. cap. 4, p.89-134.

## APÊNDICE I

## I - Características técnicas do trator de tração

## TRATOR:

MARCA: Massey Ferguson  
MODELO: 290.4

## MOTOR (Características)

MARCA: PERKINS.  
MODELO: A 4.248.  
TIPO: Diesel, 4 tempos, injeção direta.  
N<sup>o</sup> DE CILINDROS: 4, em linha  
POTÊNCIA MÁXIMA - DIN 70020: 62,5kW (85cv), a 2200 rpm  
POTÊNCIA MÁXIMA - NBR 5484: 60,3kW (82cv), a 2200 rpm  
TORQUE MÁXIMO - DIN 70020: 303 N.m (30,9 kgf.m), a 1400 rpm.  
TORQUE MÁXIMO - NBR 5484: 294 N.m (30 kgf.m), a 1400 rpm.

## TRANSMISSÃO

TIPO: Sincronizada.  
MARCHAS: 12 velocidades à frente e 4 à ré (MF 290 4x2 e 4x4)

DISPOSITIVO DE SEGURANÇA: 6 velocidades à frente e 6 à ré (MF 290MS);  
4 velocidades à frente e 4 à ré (MF 290RA).  
Luva estriada, de resistência controlada, para atuar com fusível entre a transmissão e o pinhão do diferencial.

#### SISTEMA HIDRÁULICO DE LEVANTE A TRÊS PONTOS

TIPO: Ferguson.  
CATEGORIA: II.  
CONTROLES OPERACIONAIS: De POSIÇÃO, TRAÇÃO (PROFUNDIDADE) e REAÇÃO.  
CAPACIDADE LEVANTE: 2500 kg.

BOMBA HIDRÁULICA:

- TIPO: De pistões.
- MODELO: ISYP.
- VAZÃO: 27 l/min; 17 l/mm MF 290 CAIXA DESLIZANTE.
- PRESSÃO MÁXIMA: 210 bar (217 kgf/cm<sup>2</sup> ou 3000 lbf/pol<sup>2</sup>).

#### CONTROLE REMOTO

TIPO: Dependente (opcional).  
CONTROLE: Por válvula direcionadora de fluxo.  
BOMBA HIDRÁULICA: ISYP.  
COMANDO HIDRÁULICO  
- QUANTIDADE: Um ou 2, de duplo efeito (opcional).

- PRESSÃO MÁXIMA: 170 bar (176 kgf/cm<sup>2</sup> ou 2500 lbf/pol<sup>2</sup>).

**PNEUS (PRESSÕES)**

**DIANTEIROS (4x4):**

14.9 - 24R2 (0,9 kg/cm<sup>2</sup> - 14 lbf/pol<sup>2</sup>)

14.0 - 24R1

TRASEIROS (4x4): 23.1 - 26R2 (1,1 kg/cm<sup>2</sup> - 16 lbf/pol<sup>2</sup>).

TRASEIROS (4x4): 18.4 - 34R1.

**BITOLAS**

TRASEIRAS: 4x4: Pneu 18.4 x 34R1 - 1525 a 2335 mm.

DIANTEIRAS: 4x4: Pneu 14.9 x 24R1 - 1730 a 2040 mm.

**VELOCIDADES TEÓRICAS DE ESTRADA**

Marchas	Velocidades desenvolvidas com motor a 2200 rpm. Rodagem: 18,4 - 34 R1. km/h
	2,3
Ā	3,0
	3,9
F	5,0
R	6,4
E	8,4
N	9,6
T	12,5
E	15,9
	20,7
	26,5
	34,4
	3,5
Ā	4,5
RE	14,4
	18,7

## II - Características técnicas do trator de frenagem

### TRATOR:

MARCA: VALMET

MODELO: 138.4

MOTOR Diesel, 4 tempos, injeção direta, arrefecido a água

### CAIXA DE CÂMBIO

De engrenamento constante, sincronizado, comando através de 2 alavancas.

Nº de marchas, à frente/à ré

12/4.

Velocidades em km/h a 2300

rpm do motor

Marcha Velocidade com pneu 18.4 - 34

L1 2,1

L2 4,1

L3 5,0

M1 6,1

L4 6,7

M2 8,2

M3 9,8

H1 12,3

M4 13,0

H2 16,6

H3 19,8

H4 26,3

R1 5,3

R2 7,1

R3 8,5

R4 11,3

Bloqueio do diferencial

Mecânico, acionado por pedal.

## APÊNDICE II

Neste apêndice é apresentada uma descrição técnica da carreta tanque, suas dimensões e as condições de carga por pneu em função da lastragem.

A carreta tanque é constituída de um cabeçalho, um chassi, um reservatório e rodados. O cabeçalho é o elemento de acoplamento da carreta ao trator de tração através de um pino de engate. O chassi é formado por perfis metálicos soldados. O reservatório de formato cilíndrico foi fabricado em chapa de aço com capacidade de 2,5 m<sup>3</sup>. Possui uma abertura para entrada de água e outra para saída. Nas suas duas laterais e apoiado no chassi, foram soldadas treliças longitudinais sobre as quais fixaram-se tábuas de madeira. Sobre essa tábuas foram colocados sacos de gesso com a finalidade de aumentar a condição de lastro dos rodados.

Possui ainda dois eixos, sendo o frontal articulado em um pino que serve como direcional. Cada eixo possui dois pneus. O posicionamento dos pneus nos eixos foi de modo a que não ocorresse a sobreposição dos rastros entre os eixos.

A Figura 17 é apresentado um esquema carreta tanque. Em função da carga pretendida sobre os pneus, chegou-se as condições de lastro conforme mostra a Tabela 11.

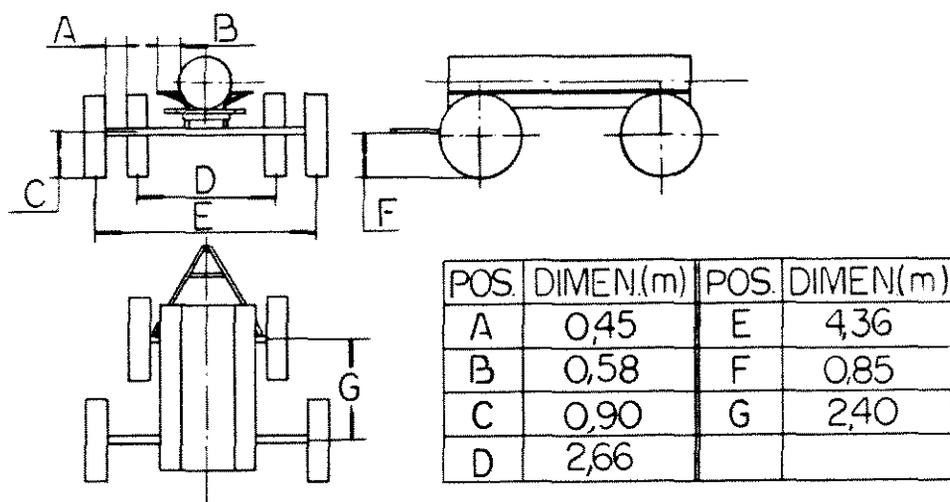


Figura 17 - Vista geral da carreta tanque.

Tabela 11 - Condições de lastro por pneu utilizadas nos ensaios.

CONDIÇÃO DE LASTRO	CARGA POR PNEU (kN)
CARRETA SEM ÁGUA COM 10 SACOS	9,3
CARRETA SEM ÁGUA COM 30 SACOS	11,3
CARRETA COM ÁGUA SEM SACOS	13,5
CARRETA COM ÁGUA COM 20 SACOS	16,5
CARRETA COM ÁGUA COM 40 SACOS	19,4

### APÊNDICE III

Neste Apêndice, são apresentadas as principais características, detalhes de instalação e calibrações efetuadas nos equipamentos utilizados.

#### III-1 Conjunto dinamométrico

O conjunto dinamométrico utilizado na elaboração desta dissertação é apresentado pelos elementos mostrados nos diagramas de blocos das figuras 18 e 19.

Na calibração do conjunto dinamométrico, utilizou-se o método direto, através de uma máquina para ensaio de tração, cuja disposição dos elementos é mostrada na Figura 18.

A máquina para ensaio de tração utilizada na calibração da célula de carga, é de marca Hosenhausenwerk, modelo VHP-6, com fundo de escala para kN e escala de 0,20 kN, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.

Através desta calibração chegou-se a seguinte equação relacionando força e tensão:

$$R_{rt} = 24.702,256 z + 196,421 \dots \dots \dots \text{Eq. III-1}$$

onde:  $R_{rt}$  → é a força aplicada na célula de carga, em N  
 $z$  → é a tensão, em V, medida pelo indicador de tensão.

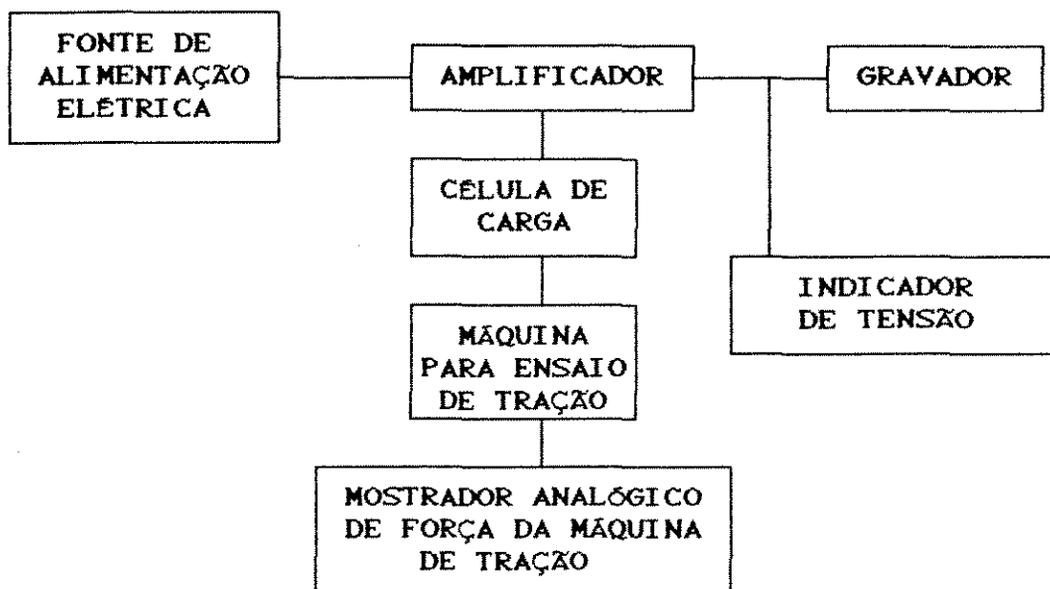


Figura 18 - Diagrama de blocos dos elementos componentes do conjunto dinamométrico durante a calibração da célula de carga.

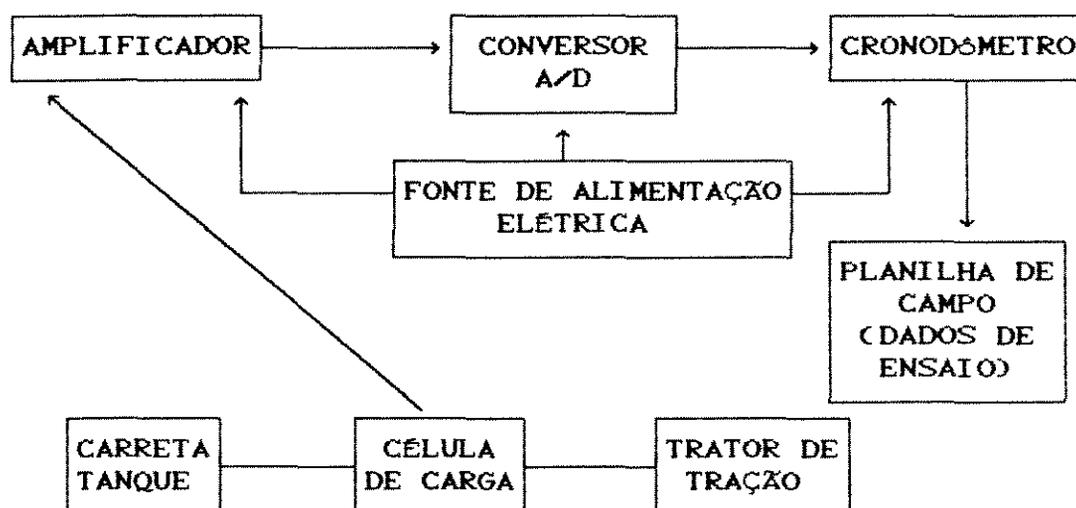


Figura 19 - Diagrama de blocos dos elementos componentes do conjunto dinamométrico para aquisição dos dados durante os ensaios de campo.

A figura 19 caracteriza o conjunto dinamométrico de aquisição dos dados para os ensaios de campo.

Com a finalidade de relacionar-se a tensão, em V, com pulsos elétricos proporcionais a força aplicada, lida no cronodômetro, utilizou-se sinais padronizados fornecidos pelo amplificador da célula de carga durante um intervalo de campo em um número de 10 repetições. Dessa forma obteve-se a seguinte relação:

$$z = \frac{P_f}{T} \cdot \frac{1,5}{5067,73} \dots\dots\dots \text{Eq. III-2}$$

onde:  $z \rightarrow$  é a tensão, em V, medida pelo indicador de tensão

$P_f \rightarrow$  pulsos elétricos proporcionais a força aplicada na unidade de tempo

$T \rightarrow$  tempo do sinal padronizado fornecido pelo amplificador.

Relacionando-se as equações III-1 e III-2, chegou-se a seguinte equação final de calibração:

$$R_{r_t} = 7,312 \frac{P_f}{T} + 196,421 \dots\dots\dots \text{Eq. III-3}$$

onde:  $R_{r_t} \rightarrow$  é a força média aplicada na célula de carga por ensaio, em N

$P_f \rightarrow$  pulsos proporcionais a força acumulada durante o ensaio

$T \rightarrow$  tempo de duração do ensaio, em m/s.

### III-2 Conjunto Odométrico

A medição das distâncias percorridas pelo comboio foi executada através de um conjunto odométrico cujos elementos constituintes são mostrados no diagrama de blocos da Figura 20.

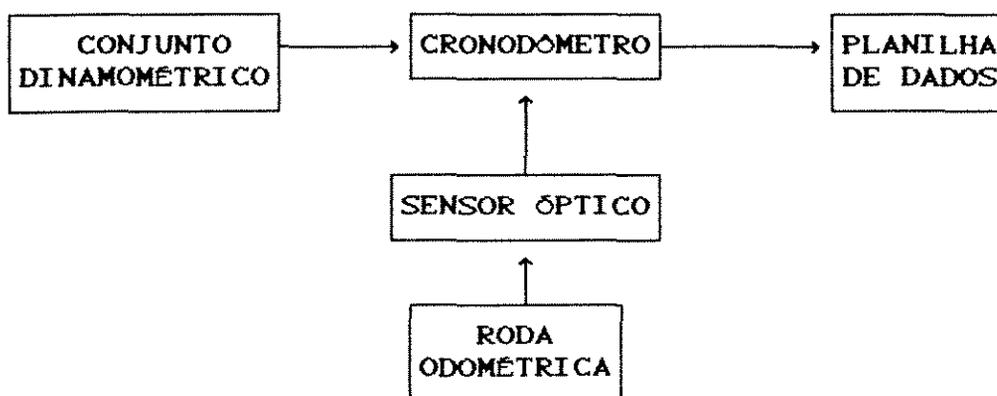


Figura 20 - Diagrama de blocos dos elementos componentes do conjunto odométrico operando com o conjunto dinamométrico.

A calibração da roda odométrica, foi realizada nos locais de ensaio duas vezes ao dia, uma antes do início dos ensaios e a outra após o final do último ensaio. Para isso percorreu-se uma determinada distância medida à partir de um número de voltas da roda odométrica através de uma trena, obtendo-se perímetro eficaz da roda odométrica.

$$P_{ero} = \frac{d}{N_o} \dots\dots\dots \text{Eq. III-4}$$

onde:

$P_{ero}$  → perímetro eficaz da roda odométrica (m)

$d$  → distância percorrida (m)

$N_o$  → número de voltas da roda odométrica

Para cada volta da roda odométrica, o sensor óptico emite 60 pulsos; à partir dessa relação determina-se a distância percorrida em cada ensaio pela equação:

$$D = \frac{P_{ero} \times n}{60} \dots\dots\dots \text{Eq. III-5}$$

onde:  $D$  → distância percorrida por ensaio, em m

$P_{ero}$  → perímetro eficaz da roda odométrica, em m

$n$  → número de pulsos da emitidos pelo sensor óptico por ensaio.

A partir do tempo medido pelo cronodômetro e a distância percorrida por ensaio determinou-se a velocidade média calculada por:

$$V = \frac{D}{T} \dots\dots\dots \text{Eq. III-6}$$

onde:  $V$  → velocidade média no ensaio (m/s)

$D$  → distância percorrida por ensaio (m)

$t$  → tempo transcorrido por ensaio (s).

## APÊNDICE IV

Características básicas<sup>7</sup> dos pneus  
utilizados:

Dimensões .....	18.4/34
Número de Lonas .....	10
Tipo de Construção .....	DIAGONAL
Tipo de Banda de Rodagem .....	R1

---

<sup>7</sup> Segundo a Associação Brasileira de Pneus e Aros.

## APENDICE V

Planilha de resultados de resistência ao rolamento (RR), em kN e velocidade (V), em m/s.

TRATAMENTO	VELOCIDADE (m/s)	RESISTÊNCIA DO ROLAMENTO (kN)
1	1.3146	0.6607
2	1.3022	0.7261
3	1.3041	0.7325
4	1.3022	0.7064
5	1.3212	0.7064
6	1.9295	0.7536
7	1.9436	0.7380
8	1.8984	0.7533
9	1.9436	0.7483
10	1.8984	0.7483
11	3.1565	0.8961
12	3.2386	0.9193
13	3.2401	0.8775
14	3.2401	0.8976
15	3.2386	0.8976
16	1.3628	0.8079
17	1.3516	0.7787
18	1.3090	0.8761
19	1.3315	1.0165
20	1.3331	0.9178
21	1.8858	0.9267
22	1.9164	0.8641
23	1.9354	0.8265
24	1.9195	0.8793
25	1.9195	0.8742
26	3.1257	0.6155
27	3.1256	0.7243
28	3.1910	0.8268
29	3.0411	1.0295
30	3.1447	0.8268
31	1.3365	0.7680
32	1.3488	0.6873
33	1.3436	0.5897

TRATAMENTO	VELOCIDADE (m/s)	RESISTÊNCIA DO ROLAMENTO (kN)
34	1.3099	0.5791
35	1.3488	0.6560
36	1.9018	0.9515
37	1.8353	0.9314
38	1.9162	0.9998
39	1.9241	0.9003
40	1.9084	0.9747
41	3.0564	1.0092
42	3.1022	0.9468
43	3.0097	0.9433
44	3.0564	0.9664
45	3.0097	0.9664
46	1.3398	0.5661
47	1.3636	0.5326
48	1.3434	0.5063
49	1.3610	0.5342
50	1.3636	0.5348
51	1.9622	0.5131
52	1.9243	0.6767
53	1.8808	0.6081
54	1.9566	0.6465
55	1.9160	0.5962
56	3.1161	0.6719
57	3.0633	0.6433
58	3.1028	0.7026
59	3.1342	0.7215
60	3.1028	0.6848
61	1.3208	0.5131
62	1.3575	0.5736
63	1.3208	0.5537
64	1.3476	0.5154
65	1.3208	0.5390
66	1.9444	0.5227
67	1.9266	0.5738
68	1.9169	0.5820
69	1.9364	0.5886
70	1.9266	0.5668
71	3.0435	0.7222
72	3.0724	0.7063
73	3.1048	0.7453
74	3.1275	0.7149
75	3.0724	0.7222
76	1.3711	0.4274
77	1.3221	0.4722
78	1.3193	0.4849
79	1.4499	0.4556
80	1.3711	0.4600
81	1.9722	0.6245
82	1.9440	0.6653

TRATAMENTO	VELOCIDADE (m/s)	RESISTÊNCIA DO ROLAMENTO (kN)
83	1.9607	0.6205
84	1.9420	0.5876
85	1.9440	0.6245
86	3.1924	0.5750
87	3.1315	0.4817
88	3.1784	0.5215
89	3.0905	0.5636
90	3.1784	0.5355
91	1.3412	0.7156
92	1.3319	0.8285
93	1.3491	0.7636
94	1.3412	0.7692
95	1.3319	0.7692
96	1.9185	1.0262
97	1.9192	1.0546
98	1.9241	1.0292
99	1.9238	0.9181
100	1.9185	1.0070
101	3.0849	0.9794
102	3.0496	0.9290
103	3.0818	0.9591
104	3.0849	0.9558
105	3.0496	0.9558
106	1.3463	0.8823
107	1.3221	0.8333
108	1.3248	0.9141
109	1.3463	0.8766
110	1.3248	0.8766
111	1.9160	0.9383
112	1.9117	0.9303
113	1.9137	0.9626
114	1.8833	0.9219
115	1.8833	0.9383
116	3.0628	0.9210
117	3.0702	0.9621
118	3.0318	1.0221
119	3.0628	0.9684
120	3.0318	0.9684
121	1.3372	0.9516
122	1.3133	1.0964
123	1.3070	1.2032
124	1.3174	1.0977
125	1.3174	1.0872
126	1.9164	1.1700
127	1.9122	1.0008
128	1.8957	1.1793
129	1.9465	0.9841
130	1.9133	1.0836
131	3.0599	0.8988

TRATAMENTO	VELOCIDADE (m/s)	RESISTÊNCIA DO ROLAMENTO (kN)
132	2.9099	1.2833
133	2.8754	1.1794
134	3.0024	1.1088
135	3.0024	1.1176
136	1.3485	0.6153
137	1.3183	0.5746
138	1.3477	0.5950
139	1.3005	0.5522
140	1.3145	0.5358
141	1.9084	0.7109
142	1.8758	0.6575
143	1.8909	0.6330
144	1.9597	0.5793
145	1.9256	0.5760
146	3.0811	0.5986
147	3.0096	0.5755
148	3.1030	0.7560
149	3.0928	0.7461
150	3.0272	0.8034
151	1.3489	0.6534
152	1.3436	0.6625
153	1.3460	0.6757
154	1.3489	0.6534
155	1.3460	0.6613
156	1.9190	0.7056
157	1.9428	0.7507
158	1.9028	0.6306
159	1.9386	0.7229
160	1.9386	0.7264
161	3.1588	0.7907
162	3.1705	0.8289
163	3.1235	0.7653
164	3.1157	0.7006
165	3.0486	0.7188
166	1.3605	0.6802
167	1.3511	0.6782
168	1.3286	0.7841
169	1.3363	0.7664
170	1.3428	0.7373
171	1.9291	0.7581
172	1.9424	0.7530
173	1.9350	0.7229
174	1.9314	0.8329
175	1.8744	0.7335
176	3.0595	0.6943
177	3.1283	0.7825
178	3.1121	0.6718
179	3.1680	0.6286
180	3.1283	0.6943

TRATAMENTO	VELOCIDADE (m/s)	RESISTÊNCIA DO ROLAMENTO (kN)
181	1.2814	1.2047
182	1.2940	1.1251
183	1.3063	1.1077
184	1.2989	1.1529
185	1.2940	1.1476
186	1.9002	1.1354
187	1.9386	1.0545
188	1.8884	1.1124
189	1.9111	0.9158
190	1.8884	1.0545
191	3.0155	1.1123
192	3.0400	1.2425
193	2.9649	1.2813
194	3.0245	1.1933
195	3.0245	1.2074
196	1.3240	0.9948
197	1.2987	1.2072
198	1.2930	1.3347
199	1.3183	1.1658
200	1.2922	1.0354
201	1.8885	1.1057
202	1.9386	1.2090
203	1.8757	1.2276
204	1.9072	1.1904
205	1.9386	1.1832
206	3.0856	0.9845
207	2.9903	1.2118
208	3.0310	1.1300
209	3.0856	0.9845
210	3.0310	1.0777
211	1.2355	0.9192
212	1.2493	1.0867
213	1.3401	1.0965
214	1.3080	1.0801
215	1.3208	1.0972
216	1.8528	1.2666
217	1.8555	1.2419
218	1.9086	1.2956
219	1.9187	1.0102
220	1.9131	1.1956
221	2.9875	1.2047
222	2.8589	1.4441
223	2.9681	1.1181
224	2.8589	1.2556
225	2.9681	1.2556