



CARLOS RODRIGUES DOS SANTOS NETO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ESTABILIDADE
DIRECIONAL DE VEÍCULOS AGRÍCOLAS DE RODAS EM
TERRENOS DECLIVOSOS**

CAMPINAS

2012

i



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CARLOS RODRIGUES DOS SANTOS NETO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ESTABILIDADE
DIRECIONAL DE VEÍCULOS AGRÍCOLAS DE RODAS EM
TERRENOS DECLIVOSOS**

Orientador: Prof. Dr. Oscar A. Braunbeck

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio G. Magalhães

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção de título de Doutor em Engenharia Agrícola.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO CARLOS RODRIGUES DOS SANTOS NETO
E ORIENTADO PELO PROF. DR. OSCAR ANTONIO BRAUNBECK

Assinatura do Orientador

Errata- onde se lê: "...obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola."

Leia-se: "...obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Máquinas Agrícolas."

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA
Matrícula 29041-2
Coordenador de Pós-Graduação
FEAGRI/UNICAMP

CAMPINAS

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sa59a	<p>Santos Neto, Carlos Rodrigues dos Análise experimental da estabilidade direcional de veículos de rodas em terrenos declivosos / Carlos Rodrigues dos Santos Neto. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientador: Oscar Antonio Braumbeck Coorientador: Paulo Sérgio Graziano Magalhães. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.</p> <p>1. Dinâmica. 2. Estabilidade. 3. Deformação (Mecânica). 4. Veículos - Dinâmica. 5. Veículos a motor - Dinâmica. I. Braumbeck, Oscar Antonio, 1943-. II. Magalhães, Paulo Sérgio Graziano, 1957-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Experimental analysis of the directional stability of wheeled
agricultural vehicles on sloping terrains

Palavras-chave em Inglês: Dynamics , Stability, Deformation (mechanics), Vehicles -
Dynamics, Motor vehicles - Dynamics

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

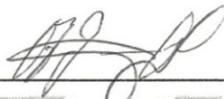
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Argemiro Luis de Aragão Costa, Ila Maria Corrêa, Franco
Giuseppe Dedini, Nelson Luis Cappelli

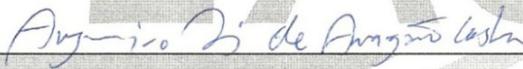
Data da defesa: 13-08-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

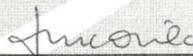
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Carlos Rodrigues dos Santos Neto**, aprovada pela Comissão Julgadora em 13 de agosto de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



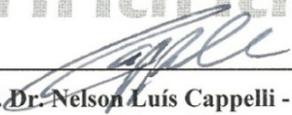
Dr. Argemiro Luis de Aragão Costa - Membro Titular
Pirelli



Dra. Ila Maria Corrêa - Membro Titular
IAC



Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini - Membro Titular
FEM/Unicamp



Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Dedico o trabalho a
minha esposa Catia e aos meus
pais José Carlos e Julia Edna.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Oscar A. Braunbeck pelo apoio e a motivação depositada no decorrer de todo o trabalho.

Ao Professor Paulo Magalhães pela atenção e o auxílio para um bom andamento deste trabalho.

A todos da Feagri que direta ou indiretamente contribuíram nas soluções de problemas existentes.

A Direção da Fundação Inaciana Padre Sabóia de Medeiros por propiciar todas as ferramentas necessárias na restauração do protótipo utilizado nos estudos de campo.

Ao Professor Dr. Roberto Bortolussi por todo o auxílio prestado.

À Adelaide Bispo de Sá Carrer e Catia Cilene da Silva do Centro de Laboratórios Mecânicos por toda a prestação de serviços necessários.

A todos do Centro de Laboratórios Mecânicos da Fundação Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, em especial ao José Maria.

Ao Vinícius Coelho, Felipe Fadani, Felipe Zoppi, Fernando Requena, Gustavo e Igor Maldonado pelo trabalho conjunto de preparo e testes de campo.

Ao Dr. Argemiro Costa pelo auxílio técnico e a doação dos pneus utilizados no trator.

RESUMO

SANTOS NETO, Carlos Rodrigues dos. *Análise experimental da estabilidade direcional de veículos agrícolas de rodas em terrenos declivosos*, Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2012, 129 p., Doutorado.

A deficiência direcional de equipamentos agrícolas autopropelidos restringe o seu uso em terrenos onde a declividade é superior a 12%, inibindo um processo de mecanização agrícola adequado. Partindo-se de um veículo equipado com um sistema de direção e propulsão atuando nas quatro rodas foi desenvolvido um estudo sobre o comportamento do ângulo de esterçamento nas rodas dianteiras e traseiras necessário para manter o veículo em sua trajetória desejada. Para tanto, as forças que agem no movimento do veículo foram determinadas, principalmente as forças laterais geradas no contato do pneu com o solo. Estas forças foram medidas com o auxílio de uma roda dinamométrica em diversas condições de carregamento, superfície, ângulo de esterçamento e pressão de inflação do pneu. Os resultados obtidos revelam que o aumento do ângulo de esterçamento da roda direcional aumenta a força transversal que atua sobre o pneu e que o tipo de piso de tráfego e de cobertura tem grande influência na deformação transversal do pneumático, pisos mais firmes permitem aumento mais linear da força transversal, a variação de pressão e de carga vertical também causa alteração neste comportamento principalmente quando se trata de pisos macios com e sem cobertura. A ação de uma força longitudinal no rodado oriunda do torque aumenta a rigidez ocasionando uma diminuição na deformação da linha equatorial do pneu, minimizando a deriva. Com o intuito de contribuir com o aprimoramento do desempenho direcional de veículos agrícolas foi desenvolvido um modelo para prever a força transversal desenvolvida na interface pneu-solo em função do ângulo de esterçamento, o tipo de piso, a pressão de inflação e a carga vertical aplicada ao pneu.

Palavras chaves: Dinâmica; Estabilidade; Deformação (Mecânica); Veículos – Dinâmica; Veículos a motor - Dinâmica.

ABSTRACT

SANTOS NETO, Carlos Rodrigues dos. *Experimental analysis of the directional stability of wheeled agricultural vehicles on sloping terrains*, Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2010, 129 p., Tese de Doutorado.

Directional disability of self-propelled vehicles restricts their use in agricultural land where the slope exceeds 12%, inhibiting a process of appropriate agricultural mechanization. A study was conducted on the steering ability of a vehicle having four wheel drive and four wheel steering. For that purpose the forces acting on the vehicle were determined, especially the lateral forces generated by the tire in contact with the ground. These forces were measured with the aid of a gage wheel under varying conditions of loading, surface type, steering angle and internal pressure. The results show that the increase of the steering angle of the wheel increases the lateral force acting on the tire. The type of traffic ground and its coverage have great influence on the lateral deformation of the tire; firmer soils allowed more linear increase of the transversal force under the increase of the steering angle. The variation of the tire pressure and vertical load applied to it also causes changes in steering behavior especially when it comes to soft soils with and without coverage. The action of a longitudinal force coming from the torque applied to the wheel increases the stiffness of the tire causing a decrease in the deformation of the equatorial line of the tire, minimizing the drift. In order to contribute for the improvement of the steering performance of agricultural vehicles a model was developed to predict the lateral force developed at the tire-soil interphase depending on the steering angle, the floor type, inflation pressure and vertical load applied to the tyre.

Keywords: Dynamics; Stability; Deformation (mechanics); Vehicles Dynamics, Motor vehicles – Dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Ilustração da deformação lateral do pneu sob ação de uma força transversal, induzindo uma mudança de trajetória.	2
Figura 02: Vista frontal do pneu sem e com deformação.	3
Figura 03: Modo de giro fora da fase (3a) e modo de giro em fase (3b).	4
Figura 04: Força peso (P) e suas componentes e a reação dos pneus (Fy).	9
Figura 05: Deformação do pneu quando sujeito a força transversal provocando alteração de trajetória.	10
Figura 06: Deformação transversal do pneumático submetido a uma força transversal ocasionando o ângulo de deriva.	11
Figura 07: Sistema de coordenadas definida pela SAE.	11
Figura 08: Esterçamento ideal ou geométrico das rodas direcionais de um veículo.	14
Figura 09: (a) Sistema de geometria trapezoidal. (b) Diferença de ângulo da roda interna e da roda externa no esterçamento.	15
Figura 10: Geometria trapezoidal, ângulo de esterçamento δ_i , ângulo de esterçamento δ_e , ambos em função do raio de curvatura R, distância entre eixos L e a bitola t.	16
Figura 11: Modos direcionais de equipamentos com direção nas quatro rodas.	16
Figura 12: Esterçamento das rodas no modo em fase.	17
Figura 13: Esterçamento das rodas no modo fora de fase.	18
Figura 14: Comparação entre os ângulos de deriva dos rodados dianteiros em relação aos rodados traseiros caracterizando a conduta de esterçamento do veículo.	19
Figura 15: Modelo dinâmico de um veículo equipado com sistema direcional em quatro rodas.	20
Figura 16: Propriedades da força gerada pelo pneu (Fy) quando sujeito a uma força transversal	21
Figura 17: Principais dados de entrada e saída de um modelo experimental de um pneu.	24
Figura 18: Sistema de medição de forças em um pneu utilizando caixa de solo.	26
Figura 19 a: Ilustração da construção de uma roda dinamométrica utilizando conceitos de célula de carga.	27
Figura 19 b: Ilustração de uma roda rebocada permitindo alterações de diversas forças.	27
Figura 20: Protótipo virtual dos primeiros conceitos da roda dinamométrica a ser idealizado neste trabalho	28
Figura 21: Protótipo de um trator agrícola utilizado nos experimentos.	32
Figura 22: Roda instrumentada com sensores de deslocamento linear fixados ao aro e ao pneu de teste.	32
Figura 23: Goniômetro digital e Goniômetro analógico.	33

Figura 24: Bancada de acionamento hidráulica.	33
Figura 25: Computador portátil.	34
Figura 26: Aquisitor de dados Quantum MX 840A.	34
Figura 27: Atuador hidráulico utilizado na calibração da roda dinamométrica.	35
Figura 28: Célula de carga para leitura da força aplicada à roda dinamométrica com fundo de escala de 12500N.	35
Figura 29: Placa de apoio c/ olhais.	36
Figura 30: Placa anti-atrito.	36
Figura 31: Montagem da quinta roda com sensor de rotação.	36
Figura 32 a: Demonstração da cinemática do sistema de sensores da roda dinamométrica.	37
Figura 32 b: Projeto cinemático da estrutura do sensor e testes preliminares com um protótipo.	37
Figura 33: Camisa e êmbolo do mecanismo de deslizamento da lâmina.	39
Figura 34: Sistema de ancoragem da lâmina de deformação ao sistema de deslizamento e a lâmina de deformação.	39
Figura 35: Componentes que formam a construção do sensor de deslocamento.	40
Figura 36: Montagem do sensor de deslocamento para futura fixação no interior do aro e do pneu.	40
Figura 37: Montagem final dos sensores de deslocamento linear no interior da roda dinamométrica.	41
Figura 38: Sapatas de fixação do sensor de deslocamento ao aro e sapata de fixação do sensor de deslocamento ao pneu.	42
Figura 39: Pré-montagem do sistema completo no aro da roda.	42
Figura 40: Marca indicadora da posição de montagem dos sensores e a sapata de fixação dos sensores de deslocamento linear no pneu.	43
Figura 41: Tampa de vedação da escotilha aberta no aro para montagem e inspeção dos sensores.	43
Figura 42: Fluxograma das fases necessárias para a calibração da roda	44
Figura 43: Goniômetro utilizado para a medição dos ângulos de esterçamento do sistema direcional do veículo de teste.	45
Figura 44: Ajuste do sistema direcional para cada ângulo de teste escolhido.	45
Figura 45: Roda dinamométrica apoiada sobre a plataforma e devidamente conectada ao sistema de aquisição de dados.	46
Figura 46: Sistema anti-atrito e apoio da roda dinamométrica.	47
Figura 47: Ilustração geral do ensaio de calibração da roda dinamométrica.	47
Figura 48: Sistema de aquisição e processamento de dados da calibração.	48

Figura 49: Exemplo de uma curva de calibração estática da roda dinamométrica.	49
Figura 50: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, esterçamento 1° e pressão de inflação de 1,85 bar.	50
Figura 51: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, esterçamento 1° e pressão de inflação de 1,85 bar.	51
Figura 52: Esterçamento das duas rodas direcionais visando aumentar a força transversal desenvolvida pelo pneu.	52
Figura 53: Instalação da roda auxiliar com o intuito de se verificar a trajetória do trator em condição do teste de campo.	53
Figura 54: Fixação da quinta roda ao chassi do veículo.	53
Figura 55: Pista de apoio para a quinta roda.	54
Figura 56: Medição de índice de cone com auxílio de um penetrômetro.	54
Figura 57: Testes de campo no asfalto e no solo agrícola.	55
Figura 58: Exemplo de resposta do teste de campo, asfalto, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação do pneu de 1,85 bar e carga vertical com o peso próprio.	55
Figura 59: Diagrama de forças para o veículo de teste trafegando em plano inclinado.	58
Figura 60: Escolha da lâmina utilizada para a coleta dos dados na análise dos resultados.	60
Figura 61: Duas repetições da calibração da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	61
Figura 62: Duas repetições do teste de campo da roda dinamométrica, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 1° e pressão de inflação de 1,85 bar.	62
Figura 63: Duas repetições do teste de campo da roda dinamométrica, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	63
Figura 64: Duas repetições do teste de campo da roda dinamométrica, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	64
Figura 65: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	66
Figura 66: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	66
Figura 67: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	67
Figura 68: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical	67

de 12,5 kN.

Figura 69: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 69

Figura 70: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 69

Figura 71: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 70

Figura 72: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 70

Figura 73: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 71

Figura 74: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 72

Figura 75: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 72

Figura 76: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 73

Figura 77: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 74

Figura 78: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 75

Figura 79: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 75

Figura 80: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. 76

Figura 81: Relação entre o ângulo de esterçamento das rodas direcionais e o ângulo de deriva causado pela força transversal desenvolvida pelo pneu. 78

Figura 82: Variação da força transversal do pneu em relação ao aumento do ângulo de 80

deriva para três condições diferentes de piso.

- Figura 83: Variação do ângulo de declive proporcionado pela força gerada pelo pneu em relação ao aumento do ângulo de deriva para três condições diferentes de piso. 81
- Figura 84: Interferência do tipo de pavimento de tráfego no declive obtido pela geração de força transversal do pneu. 82
- Figura 85: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 83
- Figura 86: Duas repetições do teste de campo, superfície de asfalto, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 83
- Figura 87: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 84
- Figura 88: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 84
- Figura 89: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 85
- Figura 90: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 86
- Figura 91: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 86
- Figura 92: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 87
- Figura 93: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 88
- Figura 94: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 88
- Figura 95: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 89
- Figura 96: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. 89

Figura 97: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso de asfalto com pressão de inflação de 2,25 bars.	91
Figura 98: Perda da força transversal por ângulo de deriva com pressão de inflação do pneumático variando de 1,85 bar para 2,25 bars, em piso de asfalto.	92
Figura 99: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso com solo compactado sem cobertura com pressão de inflação de 1,85 bar e 2,25 bars.	93
Figura 100: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso com solo compactado com cobertura com pressão de inflação de 1,85 bar e 2,25 bars.	94
Figura 101: Duas repetições da calibração da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	95
Figura 102: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	95
Figura 103: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	96
Figura 104: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	96
Figura 105: Duas repetições de calibração estática, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	97
Figura 106: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	98
Figura 107: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	98
Figura 108: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	99
Figura 109: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	100
Figura 110: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	100

Figura 111: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	101
Figura 112: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	101
Figura 113: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o asfalto com pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN, com pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN, por último, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. P.P-Peso próprio = 12,5 kN e P.P + 2 KN – Peso próprio mais 2 kN = 14,5 kN.	103
Figura 114: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso sem cobertura com pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN, com pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN, por último, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. P.P-Peso próprio = 12,5 kN e P.P + 2 KN – Peso próprio mais 2 kN = 14,5 kN.	104
Figura 115: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso com cobertura com pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN; com pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN, por último, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. P.P-Peso próprio = 12,5 kN e P.P + 2 KN – Peso próprio mais 2 kN = 14,5 kN.	105
Figura 116: Posição do atuador hidráulico, localizado à frente da roda dinamométrica com o objetivo de simular força longitudinal na roda dinamométrica.	106
Figura 117: Curva de calibração da roda dinamométrica com a aplicação simultânea da força longitudinal e da força transversal.	107
Figura 118: Comparação entre a força transversal e a força longitudinal. Destaque na linha do tempo da figura 117 após 160s.	108
Figura 119: Comparação entre a deformação da lâmina interna da roda dinamométrica com a ação da força longitudinal aplicada e sem a força longitudinal aplicada.	108
Figura 120: Posição das válvulas estranguladora de vazão no sistema hidráulico do trator utilizado nos testes de campo.	110
Figura 121: Deformação da lâmina quando a roda dinamométrica é sujeita a uma força longitudinal e transversal simultaneamente, pressão de inflação de 1,85 bar, esterçamento de 3° e peso próprio.	110
Figura 122: Deformação da lâmina quando a roda dinamométrica é sujeita a uma força transversal, pressão de inflação de 1,85 bar, esterçamento de 3° e peso próprio.	111

Figura 123: Comparação entre os valores previstos de força transversal no piso de asfalto e os valores observados de força transversal no piso de asfalto.	117
Figura 124: Comparação entre os valores previstos de força transversal no piso sem cobertura e os valores observados de força transversal no piso sem cobertura.	117
Figura 125: Comparação entre os valores previstos de força transversal e os valores observados de força transversal, piso macio com cobertura.	118
Figura 126: Variação da força transversal desenvolvida pelo pneu no piso asfáltico, com a variação da pressão de inflação e do ângulo de esterçamento.	119
Figura 127: Variação da força transversal desenvolvida pelo pneu no piso macio sem cobertura, com a variação da pressão de inflação e do ângulo de esterçamento.	120
Figura 128: Variação da força transversal desenvolvida pelo pneu no piso macio com cobertura, com a variação da pressão de inflação e do ângulo de esterçamento.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 3° e pressão inflação de 1,85 bar.	56
Tabela 02 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	65
Tabela 03 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	68
Tabela 04 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	71
Tabela 05 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	73
Tabela 06 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN.	76
Tabela 7 - Resultado da força transversal para cada piso de teste variando-se o ângulo de esterçamento para a condição de força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.	77
Tabela 08 – Resultado das medidas de teor de umidade e índice de cone da superfície de terra compactada com cobertura e sem cobertura.	79
Tabela 09 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN.	85
Tabela10 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 3°, pressão interna de 2,25bars e força vertical de 12,5 kN.	87
Tabela11 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 5°, pressão interna de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN.	90
Tabela 12 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	97
Tabela 13 - Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical 14,5 kN.	99
Tabela 14 – Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN.	102
Tabela 15 - Comparação entre as forças transversais resultantes com e sem aplicação de força longitudinal.	109
Tabela 16 - Dados coletados dos testes de campo, piso asfalto.	113
Tabela 17 - Dados coletados dos testes de campo, piso com solo compacto sem cobertura.	114
Tabela 18 - Dados coletados dos testes de campo, piso com solo compacto com cobertura.	115
Tabela 19 - Comparação da variabilidade do modelo para cada escolha de regressão.	116

LISTA DE NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

a_x - Aceleração longitudinal	m/s^2
a_y - Aceleração lateral	m/s^2
B – Constante para condições particulares	ADM
b- Distância do centro do eixo dianteiro ao CG	m
ba – Altura da banda lateral do pneu	m
c – Distância do centro do eixo traseiro ao CG	m
C_α – Rigidez de curvatura do pneu	N°
d – diâmetro do pneu	m
df – Deflexão do pneu	m
EMOB – Mobilidade do pneu	ADM
F_y – Força transversal ao plano da roda	N
F_{xf} – Força longitudinal da roda dianteira	N
F_{xt} – Força longitudinal da roda traseira	N
F_{yf} - Força Lateral no eixo dianteiro	N
F_{yt} - Força Lateral no eixo traseiro	N
g - Aceleração da gravidade	m/s^2
L – Distância entre eixos	m
l – Largura do pneu	m
LFC – Coeficiente de força lateral	ADM
LFC_{max} – Constante para condições particulares	ADM

m - Massa total do veículo	kg
P – Força peso	N
P_y – Componente da força peso na direção y	N
P_z – Componente da força peso na direção z	N
p – pressão de inflação do pneu	bar
R - Raio de curvatura	m
t - Bitola	M
t_f – Bitola dianteira	m
t_t – Bitola traseira	m

LETRAS GREGAS

δ_e - Ângulo de esterço da roda dianteira externa ao raio de curvatura	°
δ_i - Ângulo de esterço da roda dianteira interna ao raio de curvatura	°
δ_{if} - Ângulo de esterço da roda dianteira interna ao raio de curvatura	°
δ_{it} - Ângulo de esterço da roda traseira interna ao raio de curvatura	°
δ_{ef} - Ângulo de esterço da roda dianteira externa ao raio de curvatura	°
δ_{ef} - Ângulo de esterço da roda dianteira externa ao raio de curvatura	°
δ_{id} - Ângulo de esterço ideal das rodas direcionais	°
α – Ângulo de deriva	°
α_f – Ângulo de deriva frontal	°
α_t – Ângulo de deriva traseiro	°

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.	1
2. OBJETIVO.	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	9
3.1. A ocorrência do escorregamento lateral ou desvio de trajetória.	9
3.2. Sistema de coordenadas utilizado no conjunto roda e pneu.	12
3.3. Comportamento direcional de um veículo de rodas.	12
3.3.1. Características do esterçamento geométrico ou esterçamento ideal de um veículo de rodas.	13
3.3.2. Características construtivas dos sistemas direcionais.	14
3.3.3. Características do esterçamento real ou necessário de um veículo de rodas.	18
3.4. Modelagem de pneus.	22
3.4.1. Princípios da modelagem.	22
3.4.2. Modelos de pneus aplicados em condições agrícolas.	24
3.4.3. Dispositivos e métodos de medição de força em rodas.	26
3.5. Mecânica dos solos.	28
3.5.1. Características dos diversos tipos de solos.	29
3.5.2. Plasticidade e coesão.	29
3.5.3. Resistência ao cisalhamento.	30
3.5.4. Estados e limites de consistência.	30
4. MATERIAL E MÉTODOS.	31
4.1. Material.	31
4.1.1. Descrição técnica do protótipo.	31
4.1.2. Sistema de aquisição de dados.	32
4.2. Métodos.	37
4.2.1. Detalhes construtivos da roda dinamométrica.	37
4.2.2. Procedimentos de calibração estática da roda dinamométrica.	44

4.2.3. Procedimento experimental dos testes de campo.	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.	59
5.1. Calibração estática e teste de campo com força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.	60
5.1.1. Para ângulo de esterçamento de 1°.	60
5.1.2. Para ângulo de esterçamento de 3°.	65
5.1.3. Para ângulo de esterçamento de 5°.	68
5.1.4. Para ângulo de esterçamento de 9°.	71
5.1.5. Para ângulo de esterçamento de 13°.	74
5.1.6. Análise dos resultados gerais com força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.	77
5.2. Calibração estática e teste de campo com força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 2,25 bars.	82
5.2.1. Para ângulo de esterçamento de 1°.	82
5.2.2. Para ângulo de esterçamento de 3°.	85
5.2.3. Para ângulo de esterçamento de 5°.	88
5.2.4. Análise dos resultados gerais com força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 2,25 bars.	90
5.3. Calibração estática e teste de campo com força vertical de 14,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.	94
5.3.1. Para ângulo de esterçamento de 1°.	94
5.3.2. Para ângulo de esterçamento de 3°.	97
5.3.3. Para ângulo de esterçamento de 5°.	100
5.3.4. Análise dos resultados gerais com força vertical de 14,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.	102
5.4. Avaliação do comportamento da força transversal com a variação da força longitudinal.	105
5.5. Modelo matemático experimental.	112
6. CONCLUSÕES.	123
7. TRABALHOS FUTUROS.	125
8. REFERÊNCIAS DA BIBLIOGRAFIA.	127

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Habitualmente, o agronegócio no Brasil convive com a competição existente entre produtores de uma grande variedade de produtos, entre eles, destacam-se a soja, a cana-de-açúcar e a laranja. Esta competitividade obriga cada vez mais a utilização de todas as tecnologias existentes, bem como, todas as áreas agrícolas disponíveis.

Um percentual significativo destas áreas disponíveis no Brasil tem uma declividade acentuada em sua topografia, dificultando ou até impedindo a utilização de equipamentos auto-propelidos uma vez que, o eixo longitudinal do veículo não consegue tangenciar de forma estável as linhas de plantio que estão sendo processadas pelo equipamento. Esta característica inibe o uso da mecanização, gerando a falta de competitividade para uma parcela dos agricultores.

O fato de não conseguir fazer com que o eixo longitudinal do veículo siga uma linha tangente a curva de nível, impede não só a utilização de tratores convencionais com direção apenas no eixo dianteiro, mas o uso de colhedoras montadas sobre pneus, pois o desvio lateral impede ou dificulta o processo de alimentação destas.

O desvio da trajetória tem como um dos responsáveis a deformação lateral do pneu, pois quando não está sujeito a ação de uma força transversal F_y oriunda da declividade, a sua linha equatorial não sofre um desvio localizado na região de contato, porém quando o pneu é sujeito a esta força, a deformação transversal é eminente, causando uma diferença entre o contato atual do pneu com o solo e o contato futuro. A figura 1 ilustra o fenômeno do contato do pneu com o solo sem a aplicação da força transversal (1a) e com a aplicação da força transversal (1b).

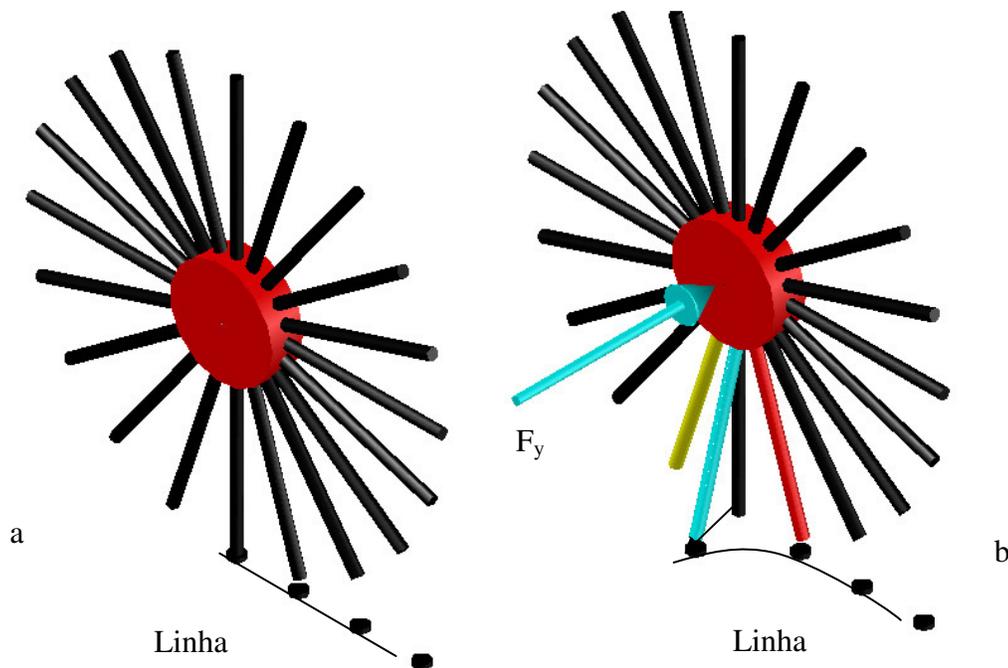


Figura 1: Ilustração da deformação lateral do pneu sob ação de uma força transversal, induzindo uma mudança de trajetória. Fonte: Dados da pesquisa.

Segundo Braunbeck e Oliveira (2006), cerca de 50% das áreas de cana-de-açúcar apresenta relevo inadequado para a colheita com colhedoras de pneus, pois quando o solo tem inclinação perpendicular ao eixo longitudinal da máquina superior a 12%, o equipamento não consegue manter um alinhamento com os sulcos de plantio devido ao desvio lateral, este provocado pela componente lateral do peso da colhedora, ocasionando deformação lateral do pneu, como ilustra a figura 2.

Além da questão da colheita, para a cana-de-açúcar existem os danos causados à soqueira pelos rodados do veículo, uma vez que o desvio de trajetória facilmente supera a pequena margem do erro de trajetória permitida.

Para o espaçamento de plantio dominante de 1,5 m deve-se descontar a largura das soqueiras que atingem 0,6 m e a largura do rodado de aproximadamente 0,5 m, resultando uma margem de erro de trajetória de apenas 0,2 m para ambos os lados do rodado. Uma tendência a fim de minimizar as questões citadas é a utilização de veículos equipados com rodado de esteiras.

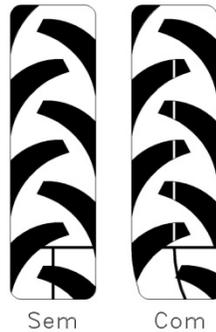


Figura 2: Vista frontal do pneu sem e com deformação. Fonte: Dados da pesquisa.

Com a ocorrência da deformação lateral do pneu e conseqüente desvio da trajetória definida pela linha de plantio, é natural que haja a tentativa de correção através do esterçamento dos rodados dianteiros, quando o veículo apresenta sistema direcional neste eixo, porém essa correção não acontece no eixo traseiro, pois estes rodados não possuem sistema direcional, o que faz com que o eixo longitudinal do veículo perca a tangencia com as linhas de plantio.

Uma opção possível é utilizar um sistema de direção nas quatro rodas, podendo este ser com esterçamento das rodas do eixo dianteiro em sentido contrário ao das rodas do eixo traseiro, fora de fase, como ilustra a figura 3a, ou com esterçamento em ambos os eixos no mesmo sentido, em fase, como mostra a figura 3b.

Cada modo de direção apresenta sua característica operacional. O modo fora de fase é utilizado no sentido de minimizar o raio de giro da máquina, já o modo em fase é utilizado para evitar que o chassi da máquina tenha o efeito de angulação de sua linha longitudinal em relação a tangente as linhas de plantio, quando este estiver em tráfego sobre terreno declivoso, propiciando as devidas correções da trajetória, com a adequada escolha do ângulo de esterçamento dos rodados dianteiros e dos rodados traseiros em relação ao ângulo de inclinação do terreno.

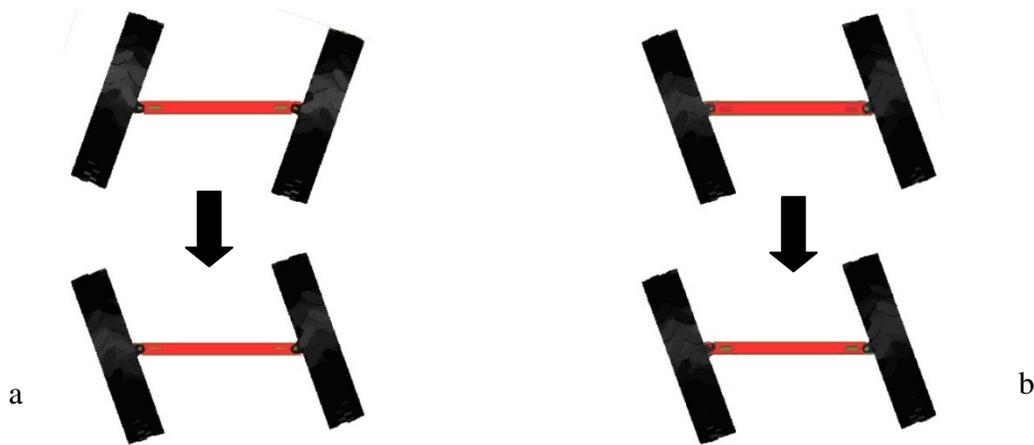


Figura 3: Modo de giro fora de fase (3a) e modo de giro em fase (3b). Fonte: Dados da pesquisa.

Equipamentos com sistema de direção em fase existem; um exemplo está nos tratores da marca Case 2470 ou nos tratores Caterpillar para a construção civil. Estes sistemas têm a possibilidade de esterçamento das quatro rodas de forma variável, implicando em movimentos independentes dos rodados dianteiros em relação aos rodados traseiros uma vez que, poderá haver uma circunstância de trajetória que implique em estercimentos diferentes entre os rodados de cada eixo.

Para que se possa determinar com melhor precisão a real necessidade de esterçamento das rodas dianteiras e traseiras, é fundamental o conhecimento do comportamento da deformação do pneu quando este estiver submetido a forças transversais em pisos macios, onde possa ocorrer a deformação deste.

Vale lembrar também, que a existência de veículos com tração nas quatro rodas é uma técnica amplamente utilizada no aumento da geração de força de tração dos equipamentos, porém esta aplicação influencia na ação da força lateral desenvolvida pelo pneu. Segundo Crolla e ElRazaz (1987), o aumento da força de tração diminui a deformação transversal do pneu ocasionando uma diminuição na deriva.

Desta maneira a motivação foi possibilitar o tráfego de veículos de rodas com estabilidade em terrenos declivosos, mantendo o eixo longitudinal do veículo tangente à linha de plantio sob a hipótese de que, a utilização de veículos com direção e tração nas quatro rodas

permite manter uma trajetória estável em terrenos declivosos, com inclinação de até o limite de escorregamento lateral do pneu com o solo.

Para tanto, estudou-se as relações entre as forças transversais que um pneu é submetido e o ângulo de deriva gerado por este. Para que fosse possível a análise do fenômeno descrito, uma roda dinamométrica foi construída, calibrada estaticamente e testada dinamicamente em três tipos de superfícies diferentes, sendo um piso rígido e outros dois macios. Em posse dos dados coletados, foi possível determinar o ângulo máximo de declive de um veículo nas referidas superfícies de apoio, além de se avaliar as conseqüências na variação de força transversal gerada pelo pneu ao se variar pressão de inflação, carga vertical, torque e ângulo de esterçamento.

CAPÍTULO 2 - OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho foi analisar experimentalmente a influência do pneumático na estabilidade direcional de veículos agrícolas de rodas quando submetido à ação de forças transversais.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1 – Projetar, construir e calibrar estaticamente uma roda dinamométrica, de forma que fosse possível medir as deformações transversais do pneu em movimento no ponto de contato com o solo para diversas forças transversais.

2 – Projetar e construir uma estrutura de ensaio, de forma que a roda dinamométrica fosse submetida a forças transversais em três tipos de pisos, sendo o primeiro o asfalto, o segundo um solo compactado com cobertura e o terceiro um solo compactado sem cobertura.

3 – Investigar o comportamento do pneumático quando sujeito a forças transversais e longitudinais simultaneamente.

4 – Modelar empiricamente com ajuste de curva o ângulo de esterçamento necessário para compensar a deriva causada pela deformação transversal do pneu.

CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As áreas agrícolas para o manejo das mais diversas culturas encontram-se frequentemente em regiões onde, a declividade se torna um fator limitante para a condução de equipamentos de autopropulsão, pois sua estabilidade transversal e longitudinal é comprometida por facilitar o tombamento e a deriva de trajetória.

3.1 A ocorrência do escorregamento lateral ou desvio de trajetória.

O tombamento lateral tem relação direta com a distância entre rodados de um mesmo eixo do veículo, mas principalmente com a altura do centro de gravidade, já o escorregamento lateral ocorre por causa da altura do centro de gravidade como no tombamento lateral, mas também pela deformação do pneu e/ou o cisalhamento do solo.

O veículo quando trafega em condição de terreno declivoso, tendo o solo inclinação perpendicular ao eixo longitudinal da máquina, uma componente de força transversal no centro de gravidade do veículo surge decorrente da força peso. A figura 04 mostra o comportamento desta força e a força de reação que o pneu gera no contato com o solo.

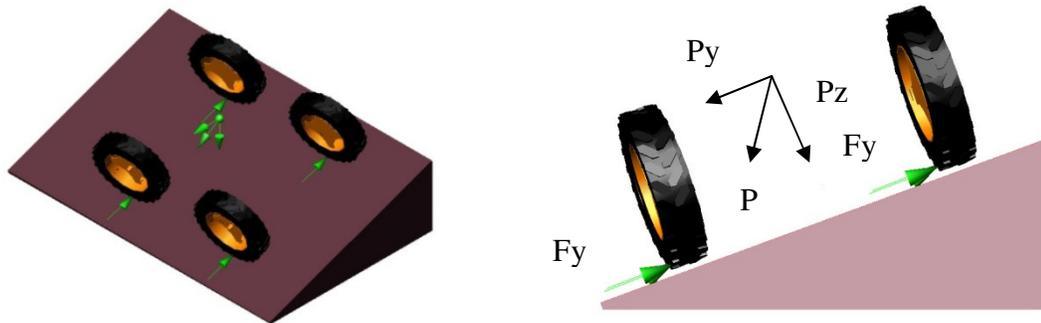


Figura 04: Força peso (P) e suas componentes e a reação dos pneus (F_y).Fonte: Dados da pesquisa.

A força de reação gerada pelo pneu causa uma deformação em seu flanco quando a área de contato toca a superfície, fazendo com que haja uma variação na trajetória original imposta. Esta definição pode ser aplicada para rodas que tenham a possibilidade de alteração de direção através de um sistema conveniente ou aquelas que apresentam direções fixas.

A figura 05 mostra como a deformação do pneu, sujeito a uma força transversal, altera a sua trajetória, pois ao rotacionar no sentido horário no plano da roda, o próximo ponto de contato da linha equatorial não é aquele feito anteriormente, mas sim um novo ponto.

Este novo ponto então define qual a trajetória que o veículo percorre em cada instante de seu movimento.

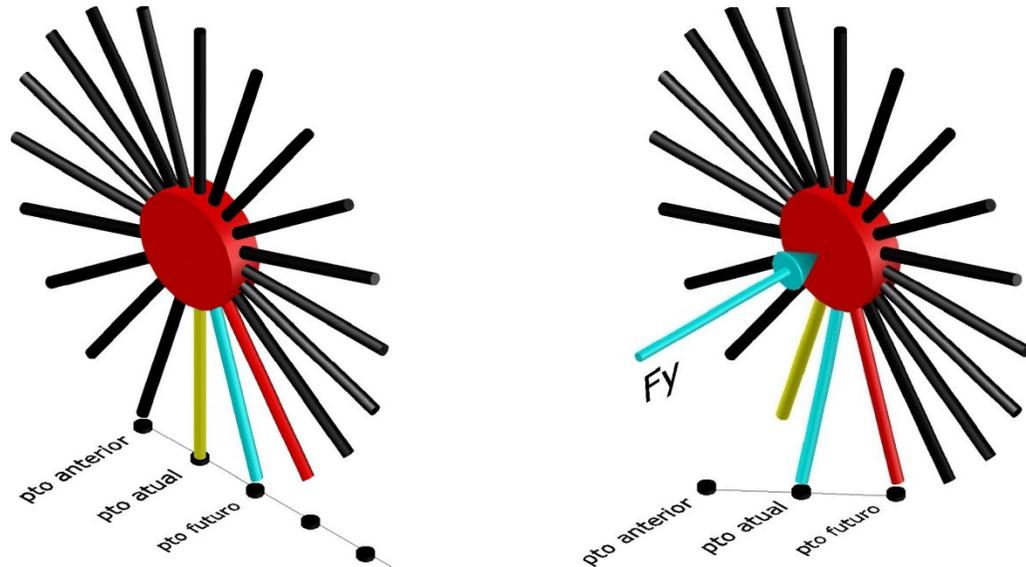


Figura 05: Deformação do pneu quando sujeito a força transversal provocando alteração de trajetória. Fonte: Dados da pesquisa.

A diferença entre a trajetória efetuada pelos pontos do pneu, sem deformação e com a deformação é definida como ângulo de deriva. Quando o pneumático opera com ângulo de deriva, a região de contato com solo deforma lateralmente em relação ao plano da roda, como ilustra a figura 06.

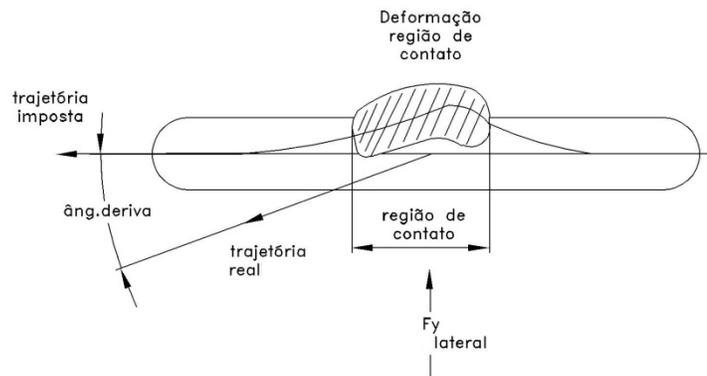


Figura 06: Deformação transversal do pneumático submetido a uma força transversal ocasionando o ângulo de deriva. Fonte: Autor “adaptado de” Gillespie, 1992, p. 348.

Vários fatores ligados diretamente com a construção do veículo e de seu sistema de fixação, ou direção da roda, interferem no comportamento deste ângulo, para descrever as forças e momentos que agem em pneus, é necessário descrever um sistema de coordenadas que sirvam de referência para definir vários parâmetros. Um sistema de coordenada recomendado pela SAE (Society of Automotive Engineers) é mostrado na figura 07.

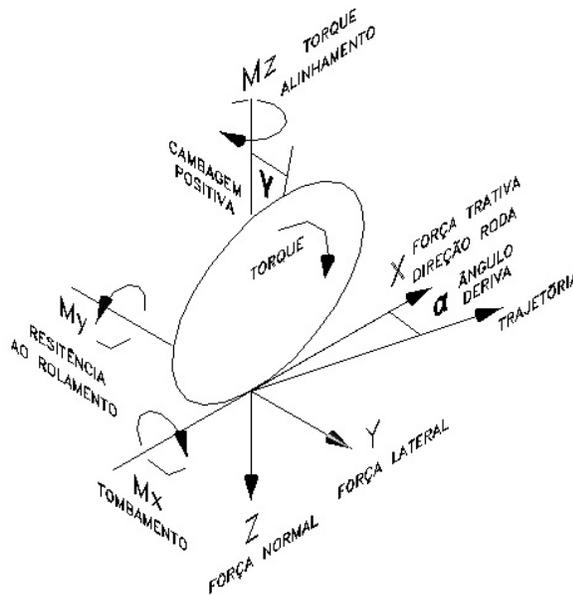


Figura 07: Sistema de coordenadas definida pela SAE. Fonte: Autor “adaptado de” Jazar (2008), p.96.

3.2 Sistema de coordenadas utilizado no conjunto roda e pneu.

Segundo Jazar (2008), a origem do sistema de coordenadas é no centro da área de contato no piso de apoio. O eixo X é a intersecção do plano da roda com ZX com o plano XY, positivo à frente do contato. O eixo Z é perpendicular ao plano XY, positivo no sentido da gravidade. O eixo Y vem da projeção do eixo de rotação da roda no plano da superfície de apoio.

Sobre o pneu são exercidas três forças e três rotações, sendo na direção X a componente de força trativa ou força longitudinal (F_x). A força lateral ou força transversal (F_y) tem componente na direção Y e a força normal (F_z) tem direção Z.

O momento M_x , rotação sobre o eixo X, caracteriza o movimento de tombamento lateral da roda vinculado à cambagem, a resistência ao rolamento M_y se caracteriza pela rotação sobre o eixo Y e por fim, a rotação sobre o eixo Z determina a condição de torque de alinhamento M_z .

Com o sistema de coordenadas adequado, alguns parâmetros do pneu podem ser convenientemente definidos. O centro de carga é determinado pela razão momento de resistência à rolagem pela força peso. A localização da força lateral é definida pela razão entre o momento de alinhamento e a força peso. O centro de contato do pneu representa a força trativa ou força de frenagem. O torque, na roda de tração, produz a força de aceleração do veículo ou de desaceleração do mesmo.

Dois ângulos, α e γ , estão associados com a rolagem da roda, o primeiro denominado ângulo de deriva, descrito anteriormente e o segundo ângulo de cambagem. A deriva é o ângulo entre o plano da roda e a trajetória. A cambagem é o ângulo formado entre o eixo Z e o plano da roda. Ambos os ângulos estão ligados a força lateral aplicada.

3.3 Comportamento direcional de um veículo de rodas.

Determinar a estabilidade de tratores agrícolas tem sido uma preocupação para engenheiros e projetistas, alguns destes trabalhos determinam os fatores que influenciam a estabilidade do trator, quando trafegando em terrenos com declividade, dentre eles, relações com as propriedades de inércia e gastos de energia com a rolagem dos pneus.

Segundo Plackett (1985), a modelagem das forças que agem sobre o pneu, relacionadas à força trativa e força de resistência ao rolamento, são geralmente mais

ênfâtizadas nos estudos que a força lateral ou transversal, porém os pneus constituem a única suspensão que o trator tem, e desta forma o instrumento que interage com a superfície quando ocorre o movimento em qualquer direção. Então é essencial que o estudo se inicie pela modelagem dos pneus, pois são eles que ditam juntamente com o solo, o comportamento direcional dos tratores.

3.3.1 Características do esterçamento geométrico ou esterçamento ideal de um veículo de rodas.

A força normal nos pneus determina o carregamento dinâmico sobre os eixos e conseqüentemente o balanço das forças quando o trator estiver em operação. A variação da carga normal no pneu interfere com o ângulo de deriva α para a mesma condição de tráfego, podendo exigir maior ou menor ângulo de esterçamento geométrico para uma mesma trajetória de plantio.

Isto não ocorre apenas com a força normal, mas também com uma série de condições variáveis relacionadas ao pneu, causando comportamentos diferenciados em sua conduta de deformação transversal, vertical e longitudinal.

Segundo Pacjenka (2006), a força longitudinal e transversal, bem como o momento do torque de auto-alinhamento tem variação em seu valor em função da pressão interna do pneu, que por sua vez varia a rigidez vertical do pneu e a deformação do pneumático no contato com o solo.

O ângulo de cambagem do rodado, positivo ou negativo, também influencia no comportamento do pneumático, fazendo com que este possa aumentar ou diminuir a capacidade do pneu em gerar força transversal. Uma vez que todas as condições discutidas resultam da interação do pneu com o solo, o tipo de solo também terá grande influência no comportamento do pneumático.

De acordo com Mazetto (2004), pressões de inflação equivocadas dos pneumáticos contribuem para a compactação do solo e no aumento da força de resistência ao rolamento.

Para diferentes condições de solo, variando-se as cargas verticais e a pressão interna do pneumático, a execução dos trabalhos de campo pode se tornar mais eficiente, segundo Upadhyaya e Wulfsohn (1990).

Desta maneira, num veículo em tráfego, uma série de variações nas condições do pneumático pode fazer com que o ângulo do esterçamento das rodas direcionais necessário para seguir uma trajetória, não seja o ângulo escolhido do esterçamento ideal, que se descreve a seguir.

Um veículo na condição de esterçamento ideal, δ_{id} , necessita de um ângulo de giro das duas rodas direcionais, diretamente proporcional à relação da distância entre eixos, dividida pelo do raio de curvatura a ser percorrido, como mostra a figura 08.

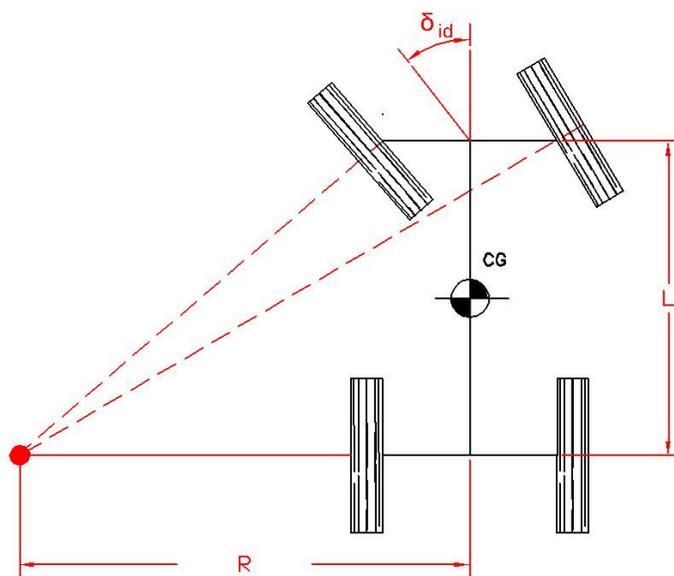


Figura 08: Esterçamento ideal ou geométrico das rodas direcionais de um veículo. Fonte: Autor “adaptado de” Gillespie (1992), p. 277.

3.3.2 Características construtivas dos sistemas direcionais.

O desenho do sistema de direção tem influência no comportamento direcional do veículo. Normalmente, a função do sistema de direção, é de causar o esterçamento das rodas dianteiras em resposta ao comando do condutor do veículo, através de um mecanismo apropriado (MIALHE, 1980).

Alguns destes mecanismos transmitem através de uma cremalheira pinhão a translação necessária para o movimento, em outros casos, o sistema tem auxílio hidráulico visando minimizar o esforço do condutor.

Os braços de esterçamento à direita e à esquerda são ligados por uma barra à haste de um atuador, a geometria formada entre o braço e a haste faz com que o ângulo de esterçamento da roda direita seja diferente do ângulo de esterçamento da roda esquerda, produzindo um efeito de geometria trapezoidal, conhecida como geometria “Ackerman”. A figura 09a ilustra este tipo de geometria aplicada ao eixo dianteiro e ao eixo traseiro e a figura 09b a possibilidade de se obter ângulos diferentes entre a roda interna ao raio de curvatura e a roda externa ao raio de curvatura.

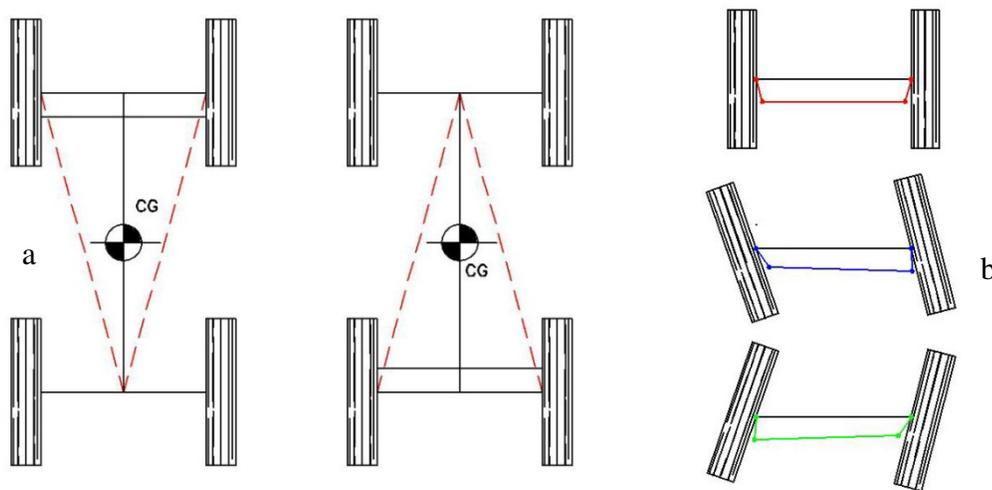


Figura 09: (a) Sistema de geometria trapezoidal (b) Diferença de ângulo da roda interna e da roda externa no esterçamento. Fonte: Autor “adaptado de” Mialhe (1980), p.201.

Através da geometria Ackerman, pode-se verificar quais são os ângulos de esterçamento provocados pelo sistema de direção, com o auxílio dos triângulos formados entre o eixo dianteiro e o eixo traseiro, como ilustra a figura 10.

$$\delta_e = \tan^{-1} \frac{L}{\left(R + \frac{t}{2}\right)} \quad (1)$$

$$\delta_i = \tan^{-1} \frac{L}{\left(R - \frac{t}{2}\right)} \quad (2)$$

Onde δ_e é o ângulo de esterçamento externo e δ_i é o ângulo de esterçamento interno.

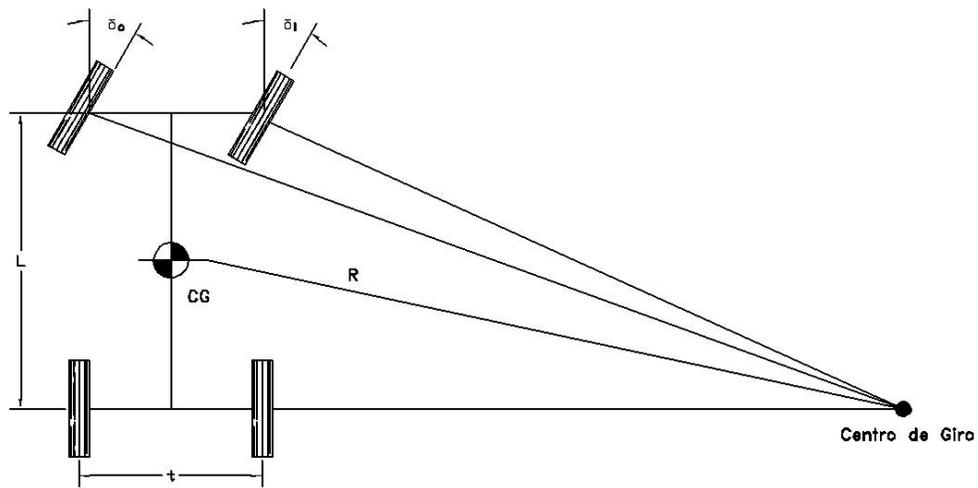


Figura 10: Geometria trapezoidal, ângulo de esterçamento δ_i , ângulo de esterçamento δ_e , ambos em função do raio de curvatura R , distância entre eixos L e a bitola t . Fonte: Dados da pesquisa “adaptado de” Gillespie (1992), p. 197.

Para veículos com dois eixos, quatro modos possíveis de direção podem ser utilizados, sendo o sistema de direção dianteiro mostrado na figura 11a, o sistema de direção traseiro mostrado na figura 11b, o sistema de direção fora de fase na figura 11c e o sistema de direção em fase na figura 11d.

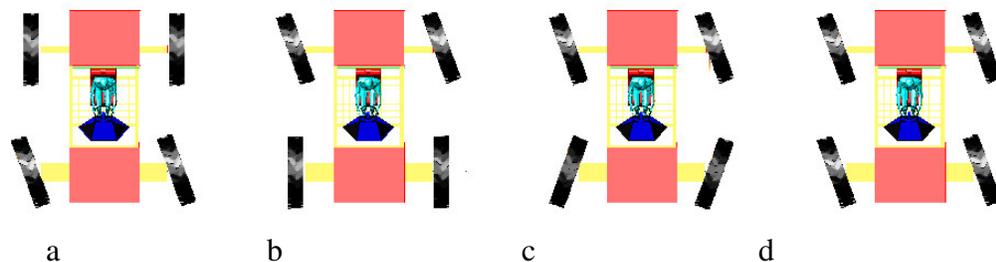


Figura 11: Modos direcionais de equipamentos com direção nas quatro rodas. Fonte: Dados da pesquisa “adaptado de” Mialhe (1980), p. 204.

Alguns mercados utilizam veículos com a possibilidade de tração e direção nas quatro rodas, conhecidos como 4WS - 4WD. O sistema dá ao trator habilidades diferenciadas que antes da implantação não seria possível. Em sua operação no campo, a aplicação da direção nas quatro rodas possibilita uma melhora na manobra diminuindo o diâmetro de giro para modo direcional fora de fase, e também uma correção direcional nos dois eixos para sistema com giro das rodas em fase, aumentando a possibilidade de dirigibilidade em planos declivosos.

A figura 12 ilustra um exemplo de correção direcional do veículo na condição de giro das rodas direcionais em fase.

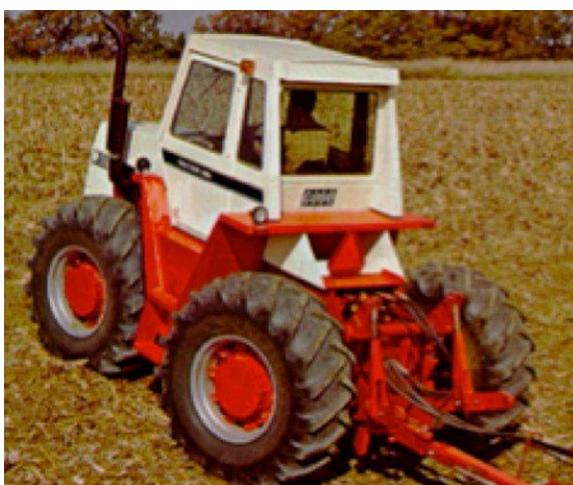


Figura 12: Esterçamento das rodas no modo em fase. Fonte: Dados da pesquisa.

A figura 13 ilustra o sistema de direcional quando é possível o esterçamento das quatro rodas com giro no sentido fora de fase, visando minimizar o diâmetro de giro em manobras.

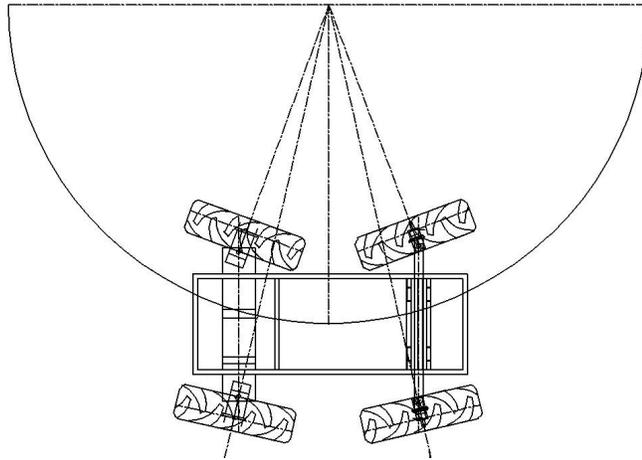


Figura 13: Esterçamento das rodas no modo fora de fase. Fonte: Dados da pesquisa.

Porém, a trajetória oferecida pelo sistema direcional, nem sempre é a trajetória necessária a ser seguida, existe uma dependência com relação à trajetória que o pneu juntamente com o solo permite o trator executar, exigindo do sistema direcional um acréscimo no ângulo de esterçamento ou um decréscimo deste, fator a ser discutido no item 3.3.3.

3.3.3 Características do esterçamento real ou necessário de um veículo de rodas.

Ocorrendo a necessidade no aumento do ângulo do esterçamento ideal para se manter a trajetória desejada, o veículo se encontrará em uma condição dita “subesterçamento”, e se ocorrer uma necessidade na diminuição do ângulo de esterçamento ideal, o veículo se encontra em uma condição dita “sobresterçamento”.

Caso não haja nenhuma necessidade na alteração de se aumentar ou diminuir o ângulo de esterçamento, ou seja, se o veículo percorre exatamente a trajetória proporcionada pelo ângulo fornecido pelo esterçamento ideal, este será considerado neutro. A figura 14 ilustra a três condições de esterçamento, caracterizando-os através do ângulo de deriva α_f para os rodados dianteiros e α_t para os rodados traseiros.

A necessidade de aumento ou diminuição no ângulo de esterçamento se dá pela compensação do erro de trajetória causado pela deformação do pneu ou pelo cisalhamento do solo, quando este for agrícola, supondo que o declive ocorra à esquerda da linha longitudinal do veículo.

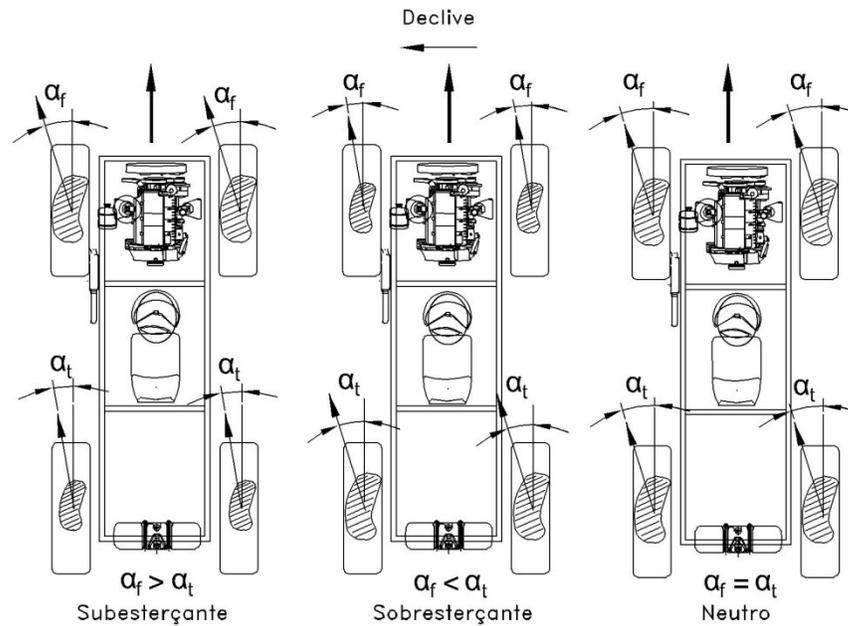


Figura 14: Comparação entre os ângulos de deriva dos rodados dianteiros em relação aos rodados traseiros caracterizando a conduta de esterçamento do veículo. Fonte: Dados da pesquisa “Adaptado de” Milliken e Milliken (1995), pag.17.

Um modelo apresentado por Gillespie (1992) descreve o ângulo de esterçamento necessário para um veículo percorrer uma dada trajetória e pode ser definido com o auxílio do modelo da bicicleta, desde que se mantenha um estado estável de movimento.

As equações do estado estável são derivadas da segunda lei de Newton com a adição das equações que descrevem o teorema de Ackerman. Algumas considerações, como o raio de curvatura ser muito maior que a distância entre eixos, a diferença entre δ_i e δ_e é desconsiderada e o esterçamento geométrico terá magnitude apenas δ .

Porém para o estudo em terreno declivoso, a ação da força transversal causada pelo raio de curvatura deve ser substituída pela ação da força peso em relação à ocorrência do declive que o veículo está sujeito.

Outro modelo é apresentado por Jazar (2008), e mostra as equações do comportamento dinâmico do veículo que se baseia nas Leis de Newton para o movimento de corpos rígidos, conforme seguem:

$$\sum F_x = m \cdot a_x \quad (3)$$

$$\sum F_y = m \cdot a_y \quad (4)$$

$$\sum M_z = I_z \cdot \dot{r} \quad (5)$$

A figura 15 mostra o modelo de quatro de rodas utilizado para traduzir a realidade dinâmica do veículo em condições de forças transversais.

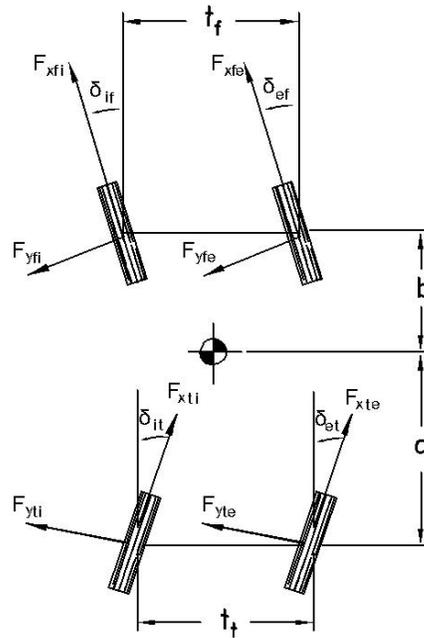


Figura 15: Modelo dinâmico de um veículo equipado com sistema direcional em quatro rodas.

Fonte: Dados da pesquisa “adaptado de” Jazar (2008), pag. 418.

$$F_x = F_{xfi} \cos \delta_{if} + F_{xfe} \cos \delta_{ef} + F_{xti} \cos \delta_{it} + F_{xte} \cos \delta_{et} - F_{yfi} \sin \delta_{if} - F_{yfe} \sin \delta_{ef} + F_{yti} \sin \delta_{it} + F_{yte} \sin \delta_{et} \quad (6)$$

$$F_y = F_{xfi} \sin \delta_{if} + F_{xfe} \sin \delta_{ef} - F_{xti} \sin \delta_{it} - F_{xte} \sin \delta_{et} + F_{yfi} \cos \delta_{if} + F_{yfe} \cos \delta_{ef} + F_{yti} \cos \delta_{it} + F_{yte} \cos \delta_{et} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
M_z = & (F_{x_{fi}} \text{sen } \delta_{if} + F_{y_{fi}} \text{cos } \delta_{if} + F_{x_{fe}} \text{sen } \delta_{ef} + F_{y_{fe}} \text{cos } \delta_{ef}) \cdot b + \\
& (F_{x_{ti}} \text{sen } \delta_{it} - F_{y_{ti}} \text{cos } \delta_{it} + F_{x_{te}} \text{sen } \delta_{et} - F_{y_{te}} \text{cos } \delta_{et}) \cdot c + \\
& (F_{x_{fe}} \text{cos } \delta_{ef} - F_{x_{fi}} \text{cos } \delta_{if} + F_{y_{fi}} \text{sen } \delta_{if} - F_{y_{fe}} \text{sen } \delta_{ef}) \cdot \frac{t_f}{2} + \\
& (F_{x_{te}} \text{cos } \delta_{et} - F_{x_{ti}} \text{cos } \delta_{it} + F_{y_{te}} \text{sen } \delta_{et} - F_{y_{ti}} \text{sen } \delta_{it}) \cdot \frac{t_t}{2}
\end{aligned} \tag{8}$$

Desta maneira, a força transversal F_y desenvolvida provém de uma reação do pneu, que ao desenvolver esta força, sofre uma deformação em seu flanco, gerando-se então um ângulo entre a trajetória ideal e a trajetória real denominada ângulo de deriva ou comumente chamado de “slip angle”.

As propriedades de ângulo de deriva podem ser analisadas através de ensaios executados com o pneu, possibilitando a determinação entre a força lateral aplicada e o ângulo de deriva gerado como mostra a figura 16.

Para pequenos ângulos de deriva, menores que cinco graus, é possível se manter uma relação linear entre a força lateral gerada pelo pneu e o seu ângulo de deriva. Esta proporcionalidade constante, C_α , é chamado de rigidez de curvatura ou “cornering stiffness”. A força lateral pode ser descrita por (GILLESPIE, 1992):

$$F_y = C_\alpha \alpha \tag{9}$$

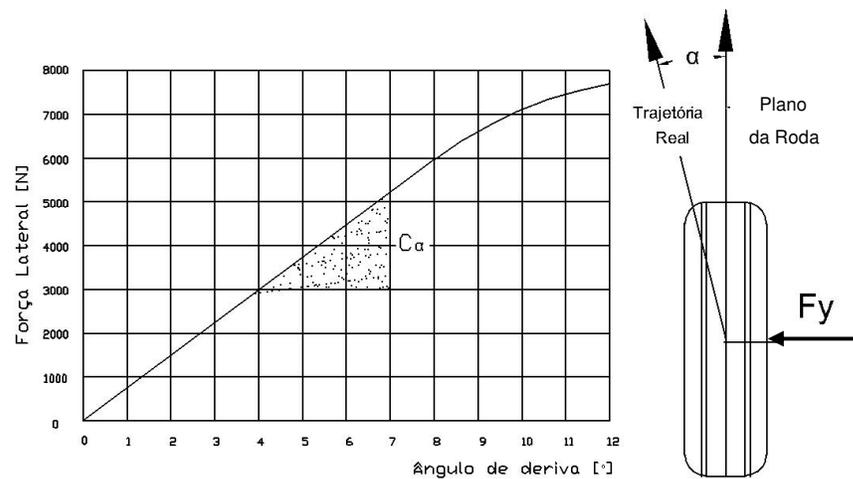


Figura 16: Propriedades da força gerada pelo pneu (F_y) quando sujeito a uma força transversal. Fonte: Dados da pesquisa “adaptado de” Milliken e Milliken (1995), p.25.

Pode-se então caracterizar a força transversal desenvolvida pelo pneu como sendo no respectivo eixo:

$$F_{yf} = C_{\alpha_f} * \alpha_f \quad (10)$$

e

$$F_{yt} = C_{\alpha_t} * \alpha_t \quad (11)$$

Se necessário, pode-se determinar os valores por roda, sendo agora incluído o índice *i* de interno e de externo.

$$F_{yfe} = C_{\alpha_{fe}} * \alpha_{fe} \quad F_{yfi} = C_{\alpha_{fi}} * \alpha_{fi} \quad (12)$$

e

$$F_{yte} = C_{\alpha_{te}} * \alpha_{te} \quad F_{yti} = C_{\alpha_{ti}} * \alpha_{ti} \quad (13)$$

Da mesma equação simplificada da geometria Ackerman para baixa velocidade, ou seja, sem considerar o ângulo de deriva, pode-se escrever agora considerando este ângulo:

$$\delta = 57,3 \frac{L}{R} + \alpha_f - \alpha_t \quad (14)$$

3.4 Modelagem de pneus.

As características dinâmicas de um veículo dependem das forças e momentos gerados no contato do pneu com o solo, o que resulta em uma necessidade de um estudo profundo em modelagem dos pneus, para que se obtenha um estudo no comportamento dinâmico de veículos. (GUO e LU, 2007).

3.4.1 Princípios da modelagem.

Os pneus têm composição complexa, formada por uma série de camadas de materiais resultando em compósitos anisotrópicos e viscoelásticos as propriedades variam com o tempo e condições operacionais, por estas razões o seu comportamento não pode ser derivado das

propriedades dos materiais que o constituem isoladamente ou de sua característica estrutural simplesmente. Simplificações são necessárias com o intuito de se criar modelos empíricos do pneu. Os modelos principais são usados para entender as forças nas três direções principais geradas pelo pneu, sua deflexão e o comportamento de sua área de contato com o pavimento. (SMITH, 2004)

Segundo Pacejka (2006), dentre eles os diversos grupos de investigação, é possível classificar os modelos de pneus, em três categorias principais:

- Modelos Empíricos: Baseados em experimentos com pneus, deduzidos a partir da teoria do comportamento físico de sua estrutura, permitindo desta forma obter forças de forma precisa, mediante a utilização de tabelas ou formulações matemáticas. Um modelo que se destaca é o elaborado por Pacejka (2006) conhecido como Magic Formula.

- Modelos Físicos: Construídos levando em conta as características estruturais do pneu, e as propriedades dos materiais que o compõe. Descrevem de forma particular o comportamento dos pneus. Dentro destes modelos, encontram-se os que são baseados em elementos finitos (OIDA et.al., 2004).

- Modelos Analíticos: A maioria destes modelos se apóia em quatro fatores, a propriedade de atrito, a distribuição de pressão, o comportamento da banda de rodagem e o comportamento da carcaça que forma o pneu. Dentre os principais modelos se encontra o modelo de Dugoff, Dugoff e Fancher (1970), o modelo de “Brush” Pacejka e Sharp (1991).

O modelo empírico, como descrito, é baseado em uma investigação experimental, fato utilizado neste trabalho e apresentado nos próximos capítulos. A escolha por um modelo experimental se deve ao tipo de pavimento em que o estudo tem interesse, o solo agrícola tem tantas dificuldades e desafios em modelagem quanto o pneu, fazendo com que esta seja a maneira mais eficiente de obtenção de resultados confiáveis.

Segundo Fernández (2005), a maioria dos modelos de pneus existentes permite especificar as características fundamentais a partir de dados experimentais, podendo-se através da variação dos dados de entrada se obter os dados de saída, que são aqueles necessários para o entendimento da dinâmica veicular, principalmente em relação à estabilidade lateral, a figura 17, através de um fluxograma, ilustra os principais dados de entrada de um sistema.

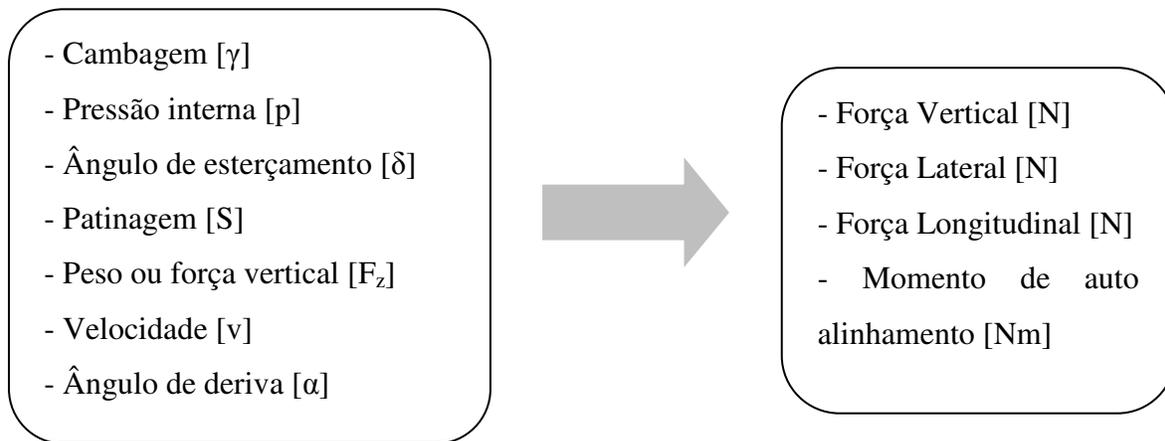


Figura 17: Principais dados de entrada e saída de um modelo experimental de um pneu. Fonte: “Adaptado de” Ramos (2008), p.8

3.4.2 Modelos de pneus aplicados em condições agrícolas.

Segundo Crolla e ElRazaz (1987), algumas propostas visando mensurar dados sobre o desenvolvimento da força lateral ou transversal em pneus agrícolas foram descritas, porém, com grande dificuldade no sentido de se administrar questões associadas com os parâmetros e controle das condições do solo.

Modelos empíricos, baseados em ajustes de curvas de testes de campo, obtinham resultados com várias formas de equações, incluindo polinômios de diferentes ordens, mas a equação com forma exponencial gerou resultados mais precisos.

A forma de se relacionar a força lateral com o ângulo de deriva é descrita pela equação (15),

$$LFC = LFC_{\max} (1 - e^{-B\alpha}) \quad (15)$$

As constantes LFC_{\max} e B , se referem a um conjunto particular de parâmetros do pneu e das condições de solo.

Algumas tendências do comportamento do pneu em superfícies macias são descritas:

- A força máxima transversal diminui com o aumento da força normal na roda;
- Pressões internas dos pneus menores, tendem a aumentar a força transversal;
- Pneus radiais têm a possibilidade de gerar forças transversais com menores ângulos de deriva em relação aos pneus diagonais.

Gee Clough e Sommer (1981) testaram dois pneus em quatro condições diferentes de solo, variando a pressão interna e a carga vertical do pneu. Os resultados tiveram boa correlação com a equação (15). Eles tentaram correlacionar os resultados obtidos anteriormente com a mobilidade dos pneus, obtendo-se uma nova equação, onde:

$$LFC_{\max} = 0,89 - 0,14 EMOB \quad (16)$$

$$EMOB = \frac{IC1d}{Rd} \sqrt{\frac{df}{ba}} \left(\frac{1}{1 + \frac{l}{2d}} \right) \quad (17)$$

Porém, os resultados não tiveram resultados estatisticamente significativos. McCallister (1984) relacionou de forma mais significativa a mobilidade com o coeficiente de força lateral máximo, obtendo-se 5% de erro, que para pneus diagonais, resultam na expressão:

$$LFC_{\max} = 0,69/EMOB + 0,61 \quad (18)$$

Com o auxílio do modelo, os resultados mostram que os parâmetros do pneu variam significativamente com as condições do solo e conseqüentemente o comportamento de movimento do trator também será afetado.

Verificou-se que tratores equipados com pneus com padrões de guarras diferentes entre os dianteiros e os traseiros, tiveram uma alteração no comportamento longitudinal.

A análise desenvolvida por Del Rosario (1980), assumindo que a área de contato do pneu com o solo é retangular e a distribuição normal de pressão é constante, descreve o “Princípio da Equivalência”, que quer dizer, para uma mesma condição de solo e parâmetros de pneus, a relação obtida entre a força longitudinal e a patinagem (para zero de ângulo de deriva), é a mesma entre a força lateral desenvolvida e a tangente do ângulo de deriva (para zero de patinagem).

Harnisch et al. (2005), o modelo é baseado nos princípios introduzidos por Bekker (1956), Theory of land locomotion. Uma característica do modelo é investigar de forma qualitativa, a influência que o piso exerce na conduta dinâmica do pneu.

Os principais resultados obtidos do modelo são as forças laterais, verticais e longitudinais dos pneus em contato com solos macios.

Modelos desenvolvidos para caracterizar o comportamento do pneu em contato do solo têm seu desenvolvimento. Observam-se trabalhos realizados há cinco décadas, evidenciando que com um adequado teste de campo, é possível se modelar e caracterizar este comportamento, desta forma um estudo sobre metodologias de teste de campo foi idealizada, justamente com o objetivo de se obter a melhor maneira de fazer estes testes.

3.4.3 Dispositivos e métodos de medição de força em rodas.

Para que a hipótese do trabalho possa ser desenvolvida, equipamentos de ensaio de pneu no interior de laboratórios não podem ser utilizados em virtude de não ser possível a alteração do tipo de pavimento de forma intensa, pois se faz necessário a construção de uma caixa de solo onde este é manipulado. A figura 18 ilustra este método.

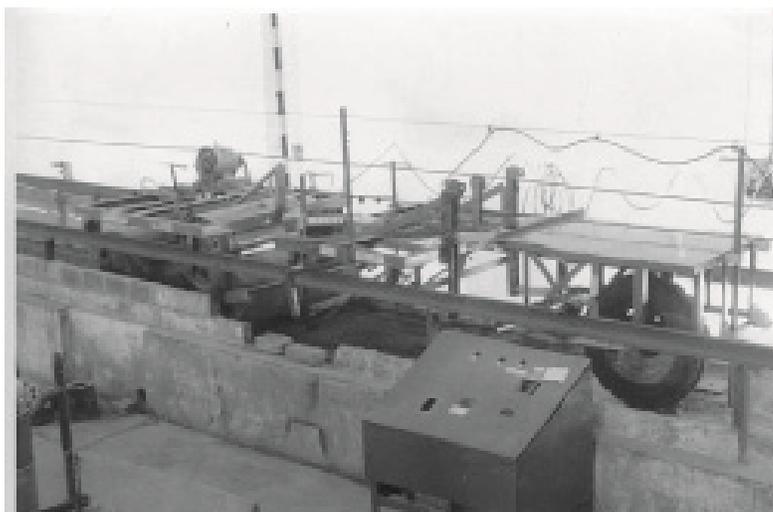


Figura 18: Sistema de medição de forças em um pneu utilizando caixa de solo. Fonte: Raheman e Singh (2004).

Desta maneira, buscou-se investigar a construção de rodas dinamométricas, que pudessem ser instaladas na máquina e trafegar pelos ambientes desejados.

As rodas dinamométricas utilizam em sua concepção células de carga, que entre outras características, tem tecnologia relativamente simples e possibilitam modificações nas rodas originais do veículo, bastando apenas acoplar a mesma.

O princípio de funcionamento desse equipamento é o de células de carga resistivas, isto é, por “strain gages” que podem convenientemente medir esforços na direção desejada,

desde que montadas adequadamente. Alguns trabalhos utilizaram esta metodologia, dentre eles pode-se citar, Gobbi et al. (2005) e Ferhadbergovic et al.(2007).

As figuras 19 a e 19 b ilustram os princípios utilizados, porém a medição de força ocorre não no contato do pneu com o solo, mas em seu apoio no aro ou na fixação da roda ao eixo.



Figura 19 a: Ilustração da construção de uma roda dinamométrica utilizando conceitos de célula de carga. Fonte: Gobbi et al.,(2005).Figura 19 b: Ilustração de uma roda rebocada permitindo alterações de diversas forças. Fonte: Ferhadbergovic et al.,(2007).

Porém, o conceito introduzido ao trabalho visou à medição de esforços no pneu, principalmente no sentido transversal, no contato deste com o solo, levando o estudo a um caminho inicial como ilustrado na figura 20.

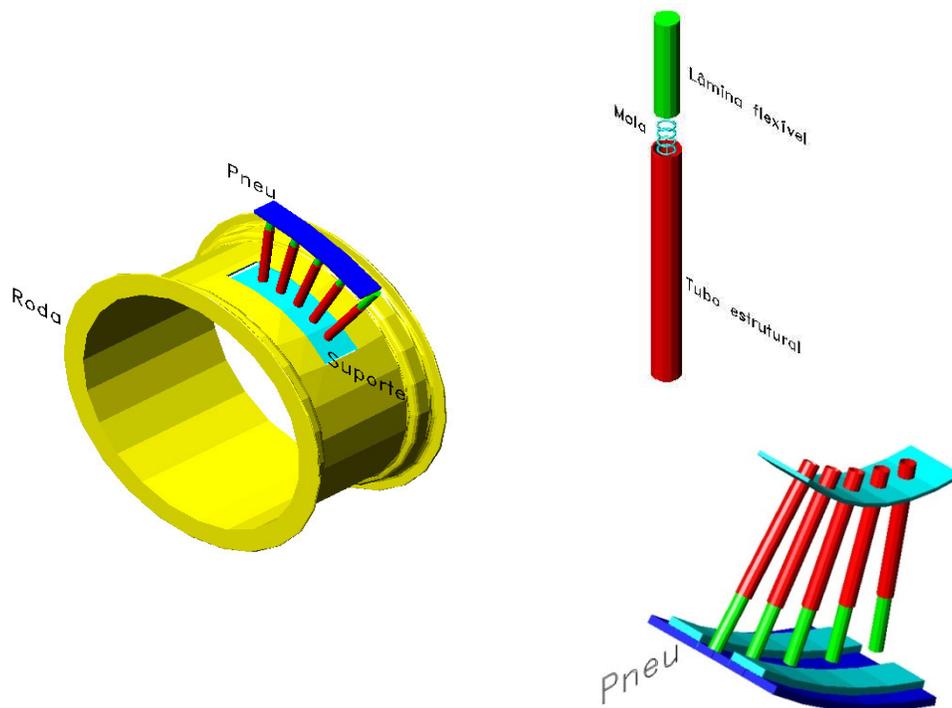


Figura 20: Protótipo virtual dos primeiros conceitos da roda dinamométrica a ser idealizado neste trabalho. Fonte: Dados da pesquisa.

A construção final da roda dinamométrica, apesar de diferenças construtivas significativas em relação à apresentada na figura 20, manteve a mesma proposta de se medir as deformações ocorridas no contato do solo com o pneu utilizando os mesmos critérios. A roda dinamométrica construída para a coleta de campo no trabalho é apresentada detalhadamente no capítulo Materiais e Métodos.

A preocupação de se efetuar as medições no contato se deu por conta de que, a investigação teria como variável o solo, necessitando um estudo sobre a sua mecânica.

3.5 – Mecânica dos solos.

O estudo de interação entre o solo e o contato do pneu faz necessária a apresentação de conceitos no âmbito da mecânica do solo. Diversas hipóteses determinam reações do solo para a estática e para a dinâmica.

Os conceitos do estudo para o movimento dos veículos que trafegam sob solo indeformável são centralizados na superfície deste, fazendo com que não haja apenas o entendimento da composição do solo, mas também do teor de água do solo, composição superficial entre outros.

3.5.1 Características dos diversos tipos solos.

A composição granulométrica, o teor de água do solo, a densidade e matéria vegetal presentes nas camadas superficiais determinam as propriedades da mecânica do solo. Dentre as descritas a composição granulométrica é a mais estável e é normalmente considerada como base para a caracterização do solo. Outros fatores como cisalhamento, plasticidade, coesão e limites de consistência são também características que definem a composição granulométrica.

Segundo Rempel (2006), uma base para o bom entendimento da interação solo-pneu sai do entendimento do comportamento da composição granulométrica do solo e podem ser descritos por três conceitos intuitivos:

3.5.2 Plasticidade e coesão.

Plasticidade é a capacidade de alguns sólidos se moldarem sem que haja merecida variação no seu volume ou sem que ocorra ruptura e a resistência a esforços externos pela ação da capilaridade entre os grãos chama-se coesão.

Partículas grandes na composição do solo indicam pouca plasticidade em função de terem grande porosidade, o que possibilita ocupação nos espaços vagos entre as partículas grandes por partículas menores. Como não há preenchimento total dos espaços entre as partículas, a compactação tem caminho aberto para ocorrer. Em função do teor de água do solo, pode haver alteração no comportamento coesivo pela modificação causada na porosidade do solo.

Já os solos compostos por partículas mais finas são menos porosos. O comportamento neste caso é predominantemente plástico, pois o solo é composto por partes finas. Uma pequena variação na proporção de partículas grossas pouco terá influência na plasticidade e coesão deste solo, portanto em se tratando de solos com pequena composição granulométrica, a forma do grão tem grande importância na definição do seu comportamento.

A plasticidade também depende do mineral que compõe o material. Como a forma do grão depende da estrutura cristalina, peculiar para cada espécie mineral, pode-se concluir então que cada espécie possuirá plasticidades diferentes.

3.5.3 Resistência ao cisalhamento.

Na maioria dos materiais sólidos, a falha ocorre quando uma condição de tensão que é imposta se iguala ou até mesmo excede a tensão limite de escoamento. O material pode sofrer de ruptura devido à tensão, compressão ou cisalhamento, normalmente quando se trata de interação do solo com o pneu a principal falha ocorrida é devida ao cisalhamento.

A tensão limite de cisalhamento do solo tem valores diferentes, onde o valor da tensão é afetado pelas condições de carregamento, pelo teor de água do solo, pela velocidade de aplicação do carregamento e a compactação.

3.5.4 Estados e limites de consistência.

Quando o teor de água do solo coesivo é muito elevado, a ponto deste solo se apresentar como um fluido denso se diz que este solo se encontra no estado líquido. À medida que a água vai sendo retirada; o solo passa para um estado mais viscoso, fazendo com que ele perca sua capacidade de fluir e então o teor de água do solo atinge o seu estado plástico, ou seja, passa a ser moldado facilmente.

Continuando-se a retirar a água, a capacidade de se moldar do solo é diminuída, até que a partir de certo teor de água (limite plástico) ele fratura ao ser moldado.

Secando ainda mais o solo, observa-se a passagem para o estado sólido, onde praticamente não há mais variação do volume com a retirada de água.

Desta maneira, para o presente estudo, duas medidas principais foram utilizadas nos testes de campo, uma delas foi o índice de cone e a outra medida foi o teor de água do solo.

CAPÍTULO 4 – MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados todos os materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho, bem como os métodos adotados para investigar a relação da força transversal desenvolvida pelo pneu com a sua pressão interna, com a sua força vertical, com a sua força longitudinal, com o ângulo de esterçamento e por fim, obter subsídios que evidenciem os benefícios ou malefícios, que a tração e a direção nas quatro rodas, podem trazer na estabilidade direcional dos veículos de rodas.

4.1 MATERIAL.

Toda a parte experimental deste trabalho foi realizada utilizando um protótipo com as características construtivas relacionadas no item 4.1.1 e ilustrado na figura 21. Os equipamentos necessários para a instrumentação estão relacionados no item 4.1.2.

4.1.1 Descrição técnica do protótipo.

Trator porta implemento com sistema de direção e tração nas quatro rodas equipado com os rodados.

Dianteiro:.....	TM – 95/12,4-24
Traseiro:.....	TM – 95/12,4-24
Aro:.....	W11
Carga Máxima:.....	1,5 kN
Volume de água em litros.....	80
Utilização.....	Sobre a terra



Figura 21: Protótipo de um trator agrícola utilizado nos experimentos. Fonte: Dados da pesquisa.

4.1.2 Sistema de aquisição de dados.

Roda dinamométrica equipada com instrumentação, gage HBM PA-06-060CA – 120L, ligado em $\frac{1}{2}$ ponte com 120Ω , montada em aro 24”(figura 22). A sua construção é detalhada no item de metodologias aplicadas.

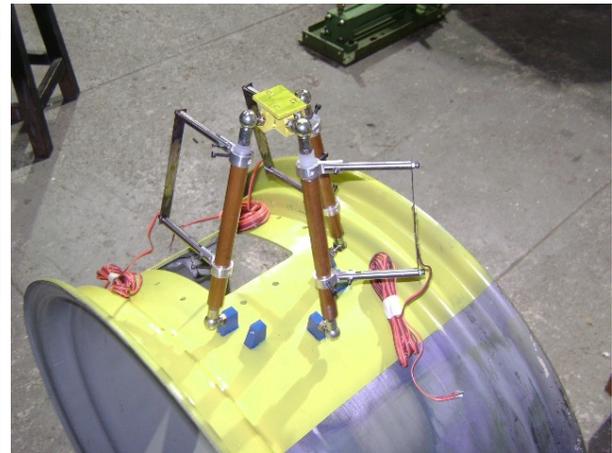


Figura 22: Roda instrumentada com sensores de deslocamento linear fixados ao aro e ao pneu de teste. Fonte: Dados da pesquisa.

Goniômetro digital com precisão $0,1^\circ$ para alinhamento vertical do veículo e goniômetro analógico com precisão de $0,05^\circ$ para medição do ângulo de esterçamento das rodas direcionais. (Figura 23).

Bancada hidráulica com Volume geométrico de 8 cm^3 , pressão de 100 bar e potência de 2,2 kW, equipada com válvula direcional quatro vias, três posições com centro fechado e válvula limitadora de pressão de um estágio. (Figura 24).

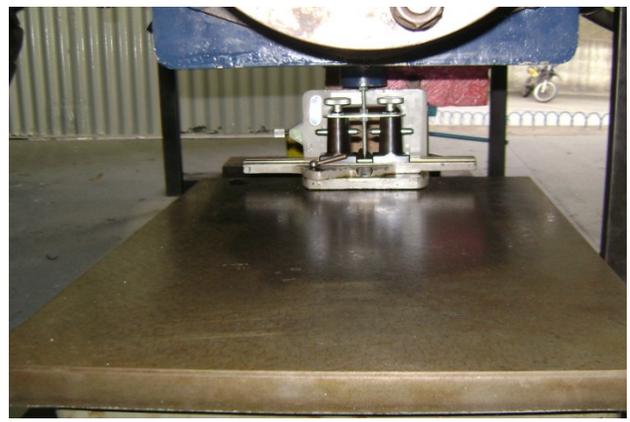


Figura 23: Goniômetro digital e Goniômetro analógico. Fonte: Dados da pesquisa.



Figura 24: Bancada de acionamento hidráulica. Fonte: Dados da pesquisa.

Notebook (Dell, Latitude E5400). (Figura 25).

Sistema de aquisição - Quantum X MX 840^a, amplificador universal de 8 canais, montado em ponte completa e meia ponte, com frequência de aquisição de 50Hz, fabricante HBM. (figura 26).



Figura 25: Computador portátil. Fonte: Dados da pesquisa.

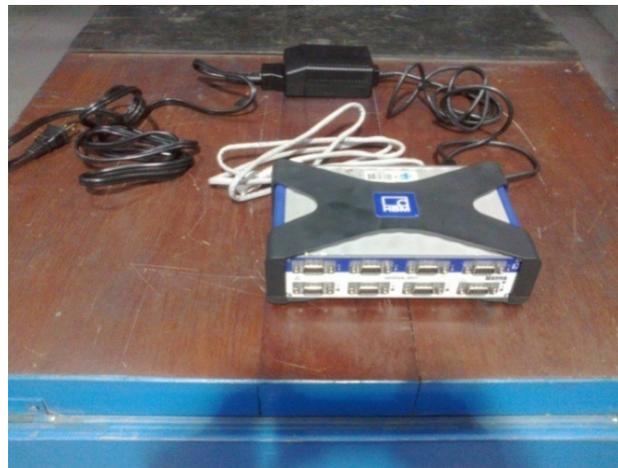


Figura 26: Aquisitor de dados Quantum MX 840A. Fonte: Dados da pesquisa.

Atuador hidráulico com curso de 300 mm, 50 mm de diâmetro de êmbolo e 25 mm de diâmetro de haste e pressão máxima de serviço 150 bar, equipado com tirantes e conexões de engate rápido. (Figura 27).



Figura 27: Atuador hidráulico utilizado na calibração da roda dinamométrica. Fonte: Dados da pesquisa.

Célula de carga com fundo de escala 12500 N. (Figura 28)



Figura 28: Célula de carga para leitura da força aplicada à roda dinamométrica com fundo de escala de 12500N. Fonte: Dados da pesquisa.

Placa de apoio vertical equipada com olhais. (Figura 29).

Placa anti-atrito equipada com 68 esferas de 10 mm de diâmetro. (Figura 30).



Figura 29: Placa de apoio c/ olhais. Fonte: Dados da pesquisa.



Figura 30: Placa anti-atrito. Fonte: Dados da pesquisa.

Quinta roda instrumentada com sensor de rotação entre o garfo e o chassi da máquina. (Figura 31)



Figura 31: Montagem da quinta roda com sensor de rotação. Fonte: Dados da pesquisa.

4.2 MÉTODOS.

4.2.1 Detalhes construtivos da roda dinamométrica.

Para a determinação da força transversal desenvolvida pelo pneu selecionado para este estudo, uma seqüência de tarefas se fez necessária. A primeira delas foi projetar uma roda dinamométrica que possibilitasse medir os esforços no contato do pneu com o solo. Desta maneira, chegou-se a uma construção como ilustram as figuras 32 a e 32 b, que permite obter um comportamento cinemático adequado dos sensores ou lâminas, pois este consegue acompanhar o movimento da banda lateral ou flanco do pneu, na retração ou no alongamento para pressões e forças maiores ou menores.

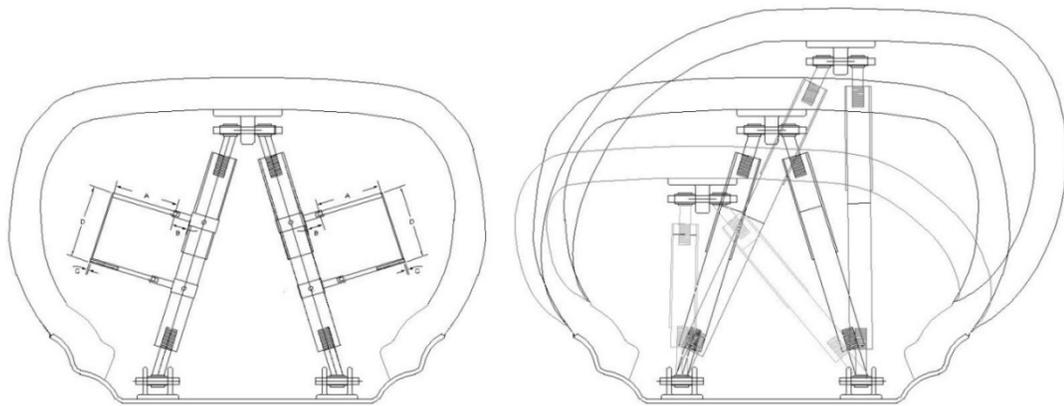


Figura 32 a: Demonstração da cinemática do sistema de sensores da roda dinamométrica.

Fonte: Dados da pesquisa.

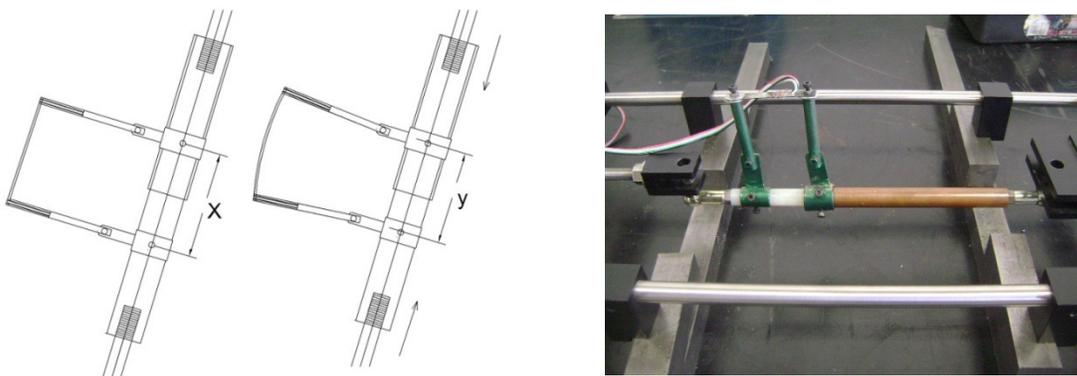


Figura 32 b: Projeto cinemático da estrutura do sensor e testes preliminares com um protótipo. Fonte: Dados da pesquisa.

Com a ação de força transversal, vertical ou longitudinal sobre o pneu, este fica sujeito a uma deformação nas três direções, fazendo com que a estrutura telescópica tenha o comportamento ilustrado na figura 32 a. Com a movimentação da estrutura varia-se a distância de x para y ou de y para x causando a deformação da lâmina como ilustra a figura 32 b. Com a correta metodologia é possível identificar uma relação entre força e a deformação ocorrida na instrumentação.

A escolha deste mecanismo se deu com principal objetivo de absorver todos os movimentos nas diversas direções possíveis, sejam elas longitudinais, verticais ou transversais. Já para os momentos gerados, um sistema de fixação da estrutura foi devidamente estudado e será mostrado a seguir.

Alguns testes preliminares foram feitos com o intuito de se identificar possíveis travamentos na estrutura, bem como fazer uma análise nos deslocamentos permissíveis pela lâmina com mostra a figura 32 b.

O fato de se utilizar três sensores de deslocamento linear no interior da roda, figura 22, é de caráter preventivo, pois no caso de se ultrapassar o limite de deformação pré-estabelecido de dois mil $\mu\text{m/m}$ dos sensores, poder-se-ia perder a eficiência da instrumentação, requerendo a troca deste, trabalho que exige muito tempo e preparo, uma vez que o sistema de sensores está confinado no interior do pneu.

Como descrito previamente, os sensores têm construção similar a um mecanismo que utiliza uma camisa (tubo) e uma haste, de forma a permitir um movimento relativo entre ambas, ou seja, a haste se move no interior do tubo. As duas partes formam uma estrutura de fixação do sensor ou lâmina. A figura 33 mostra as duas partes que formam a montagem do conjunto de deslizamento.



Figura 33: Camisa e êmbolo do mecanismo de deslizamento da lâmina. Fonte: Dados da pesquisa.

Como agente de deformação, uma lâmina instrumentada foi ancorada ao mecanismo de deslizamento através de um conjunto ilustrado na figura 34, formado por uma cinta e duas barras articuladas para a fixação da lâmina onde será feita a colagem da extensimetria.

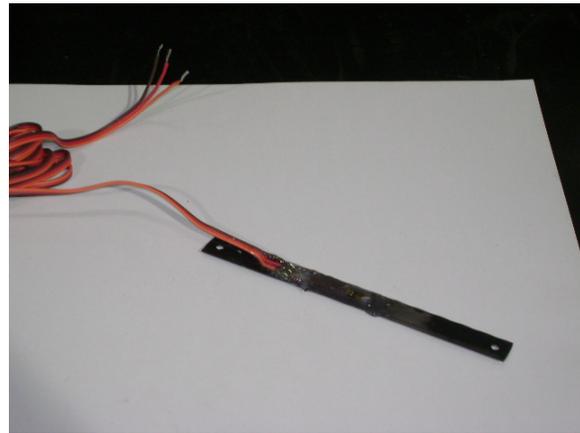


Figura 34: Sistema de ancoragem da lâmina de deformação ao sistema de deslizamento e a lâmina de deformação. Fonte: Dados da pesquisa.

A figura 35 mostra todos os componentes necessários na construção de um sensor, lembrando que na roda dinamométrica serão utilizados três conjuntos como este para a montagem completa do sistema.



Figura 35: Componentes que formam a construção do sensor de deslocamento. Fonte: Dados da pesquisa.

Com a montagem de todos os elementos, pode-se submeter a lâmina ao deslocamento previsto, lembrando que, o dimensionamento deste conjunto não permite deformações superiores a $2000 \mu\text{m}/\text{m}$. Desta maneira, o dimensional permissível do deslocamento axial da camisa em relação à haste já está definido. A figura 36 ilustra o conjunto montado para a instalação no interior do aro.

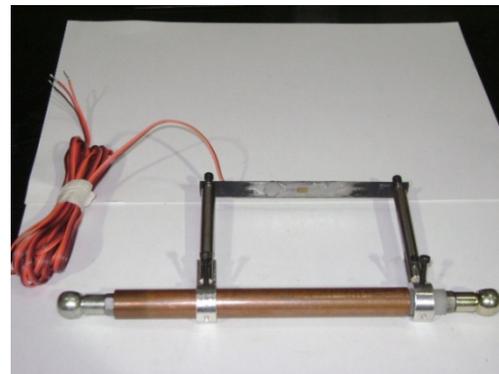


Figura 36: Montagem do sensor de deslocamento para futura fixação no interior do aro e do pneu. Fonte: Dados da pesquisa.

Para a fixação do conjunto ilustrado na figura 36, três sapatas foram soldadas ao aro da roda e mais três foram coladas na parte interna do pneu, completando a montagem sugerida na figura 37.

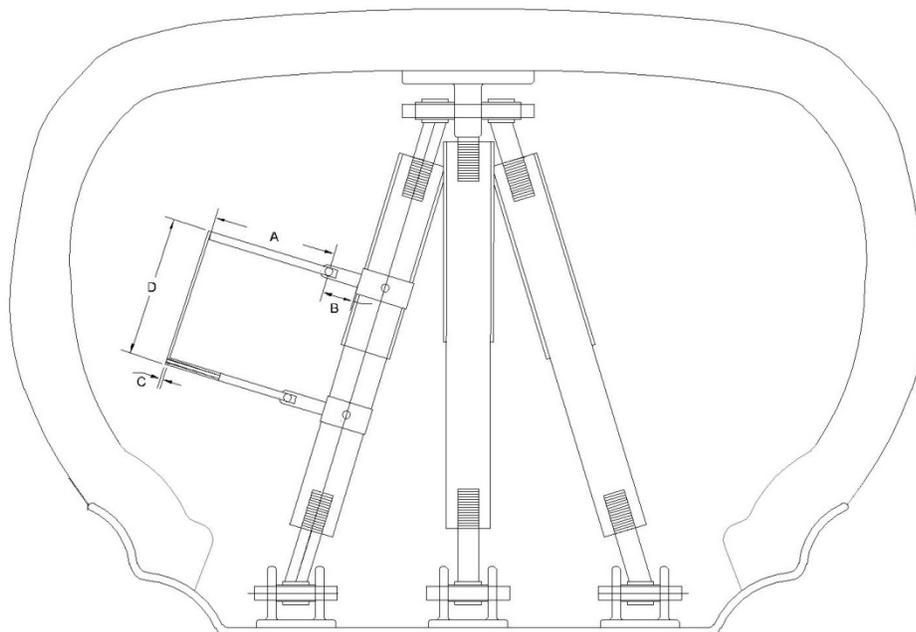


Figura 37: Montagem final dos sensores de deslocamento linear no interior da roda dinâmometrica. Fonte: Dados da pesquisa.

A fixação deste sensor à roda e posteriormente ao pneu é feita com o auxílio das sapatas ou apoios, ilustrada na figura 38, que foram construídas e dimensionadas permitindo a montagem entre os elementos aro, sensor e pneu, além de minimizar os efeitos de rotação entre o pneu e o aro por terem construção esférica, conforme mostra a figura 39.

Já na figura 40, identifica-se a posição da montagem entre os elementos roda, sensor e pneu, podendo-se obter a posição ideal de aplicação da força transversal na calibração de todo o conjunto, chamado de roda dinâmometrica.

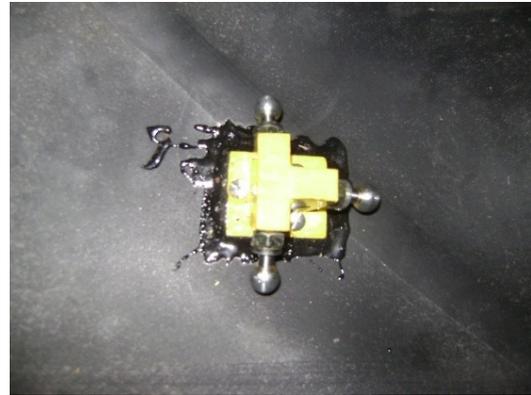
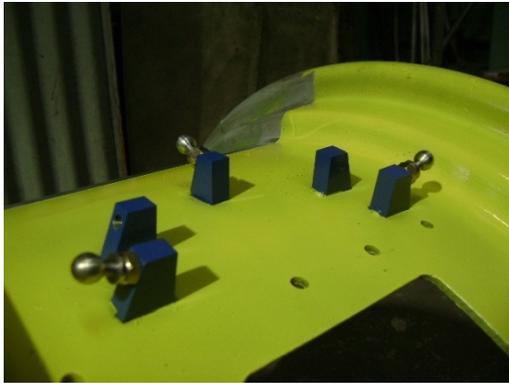


Figura 38: Sapatas de fixação do sensor de deslocamento ao aro e sapata de fixação do sensor de deslocamento ao pneu. Fonte: Dados da pesquisa.



Figura 39: Pré-montagem do sistema completo no aro da roda. Fonte: Dados da pesquisa.

A fixação no pneu é feita com auxílio três parafusos do tipo soberbos com comprimento de cinco milímetros, sendo reforçada por cola de secagem rápida tipo epóxi. Na parte lateral externa ou no flanco do pneu, uma marca foi feita com o intuito de se localizar a posição dos sensores quando todo o sistema for montado. A figura 40 ilustra ambas as características descritas.



Figura 40: Marca indicadora da posição de montagem dos sensores e a sapata de fixação dos sensores de deslocamento linear no pneu. Fonte: Dados da pesquisa.

Uma vez que a montagem dos sensores se dá entre o aro e o pneu, uma escotilha de acesso foi criada e junto com ela um sistema de vedação para evitar vazamentos. A figura 41 ilustra a tampa de vedação e a sua posição na construção da roda.



Figura 41: Tampa de vedação da escotilha aberta no aro para montagem e inspeção dos sensores. Fonte: Dados da pesquisa.

Por fim, a roda dinamométrica utiliza um aro 24”, com construção para fins agrícolas, equipada com três sensores conectados ao pneu. As lâminas adicionadas a extensômetro, “strain-gages”, trabalhando no movimento de flexionar, capta a deformação que o pneumático sofre ao entrar em contato com o solo, e ao sofrer esforços transversais ao plano da roda neste contato.

Após a montagem da roda dinamométrica, um procedimento de calibração foi elaborado e executado, sendo este descrito no próximo item.

4.2.2 Procedimento de calibração estática da roda dinamométrica.

Com a finalidade de se calibrar a roda dinamométrica, um procedimento foi elaborado visando se identificar a deformação ocorrida pelas lâminas quando esta for submetida a uma força transversal. Com os dados obtidos desta calibração, chega-se a uma relação de força aplicada e deformação ocorrida nas lâminas.

Com o auxílio de um fluxograma ilustrado na figura 42, uma seqüência de operações necessárias para se obter a calibração estática da roda foi construída.

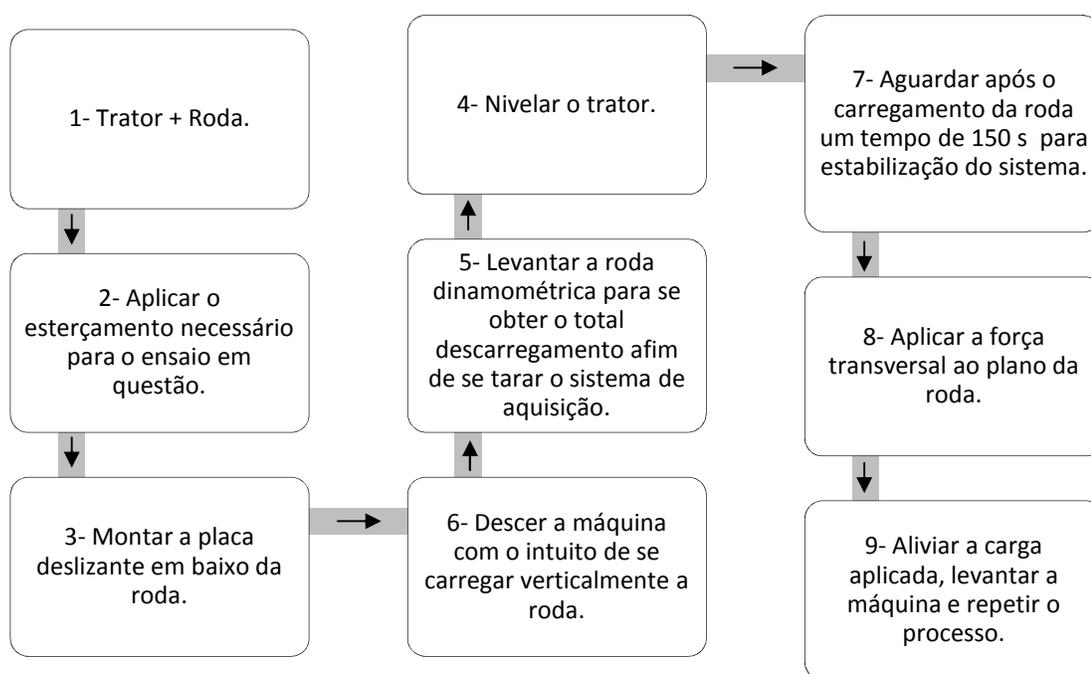


Figura 42: Fluxograma das fases necessárias para a calibração da roda. Fonte: Dados da pesquisa.

Alguns fatores foram variados durante a calibração estática da roda, entre eles resulta-se:

- Ângulo de esterçamento da roda dinamométrica (1° , 3° , 5° , 9° e 13°).
- Pressão interna do pneu (1,85 bar e 2,25bar).
- Carga Vertical (peso próprio 12,5 kN e 14,5 kN).

- Força transversal e força longitudinal (0 – 5kN).

Para a calibração da variação do ângulo de esterçamento, um goniômetro foi fixado ao pino mestre, possibilitando a identificação exata do ângulo atingindo, a visualização desta montagem se dá como na figura 43.

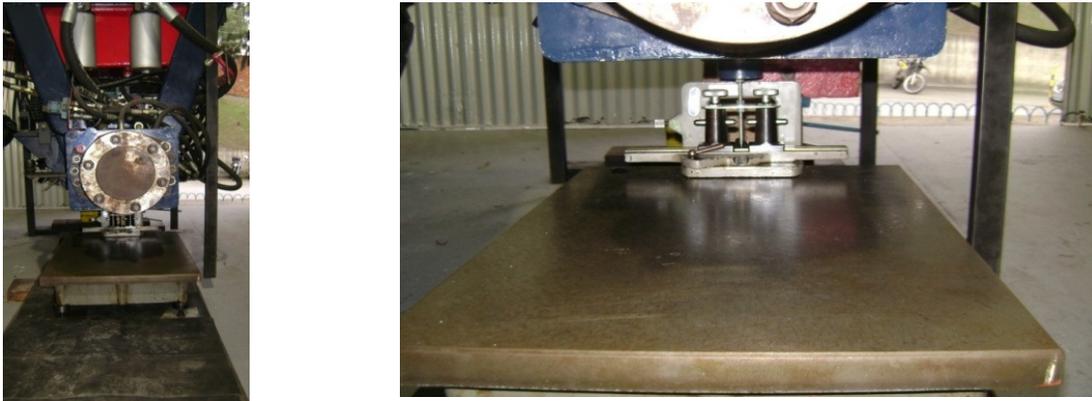


Figura 43: Goniômetro utilizado para a medição dos ângulos de esterçamento do sistema direcional do veículo de teste. Fonte: Dados da pesquisa.

Uma demarcação no sistema direcional que equipa o veículo foi feita de forma a permitir a escolha do ângulo de esterçamento para cada teste, de calibração ou de campo como ilustra a figura 44.



Figura 44: Ajuste do sistema direcional para cada ângulo de teste escolhido. Fonte: Dados da pesquisa.

A variação de pressão interna ou de inflação do pneu foi medida com um auxílio de um manômetro digital convencional. Depois de completadas as etapas anteriores, com o trator

posicionado com a roda dinâmométrica sobre a plataforma anti-atrito e os sensores devidamente ligados ao sistema de aquisição de dados, como mostra a figura 45, pode-se iniciar a aplicação das forças transversais e longitudinais desejadas.



Figura 45: Roda dinâmométrica apoiada sobre a plataforma e devidamente conectada ao sistema de aquisição de dados. Fonte: Dados da pesquisa.

Com o intuito de simular as condições de contato do solo com o pneu, a placa anti-atrito teve o objetivo de permitir que o pneumático se desloque nas direções paralelas ao solo, e transversais ao chassi da máquina.

Com uma construção em chapa de aço de 12 mm espessura e orifícios passantes em sua superfície, sessenta e oito esferas de rolamento com diâmetro de 10 mm foram encaixadas precisamente, onde sobre esta, uma segunda chapa foi sobreposta, na qual se receberá o pneu, formando um conjunto conforme figura 46.

Nesta segunda chapa, em sua parte superior onde ocorrerá o contato, uma lixa de alta rugosidade foi adicionada permitindo um aumento substancial de aderência entre o pneu e esta.

A adição da lixa no sistema foi idealizada visando evitar o escorregamento do pneu em relação à placa de apoio. Também foram montados dois olhais com o intuito de se fixar através de manilhas e cabos, a fixação dos atuadores do sistema de tração.

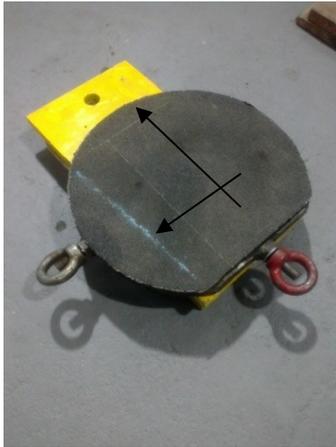


Figura 46: Sistema anti- atrito e apoio da roda dinamométrica. Fonte: Dados da pesquisa.

Com o conjunto de acessórios montado, pode-se iniciar o procedimento de calibração descrito anteriormente da roda dinamométrica, como ilustra a figura 47.



Figura 47: Ilustração geral do ensaio de calibração da roda dinamométrica. Fonte: Dados da pesquisa.

Para ocorrer a força transversal ou longitudinal anteriormente descrita, um atuador hidráulico foi chumbado na direção transversal ao plano da roda, e outro chumbado longitudinalmente a este mesmo plano.

Os atuadores foram acionados por uma bancada hidráulica, com controle de vazão através de uma válvula reguladora. A pressão máxima disponível foi determinada em função da força necessária e regulada através de uma válvula limitadora de pressão.

Os atuadores foram conectados à placa de aço (anti-atrito) com o auxílio de manilhas e, entre os olhais foi adicionada uma célula de carga que, anteriormente foi devidamente calibrada, que serviram para analisar instantaneamente a força aplicada ao sistema podendo-se confrontar com os valores de deformação obtidos pelos sensores internos do rodado.

Para a coleta de dados da célula de carga e dos sensores, utilizou-se um equipamento dedicado à obtenção dos dados, formulação de gráficos e posteriormente análise dos resultados. Os equipamentos para a coleta são um notebook (DELL LATITUDE) e um sistema de aquisição de dados (Quantum). O conjunto pode ser visualizado na figura 48.

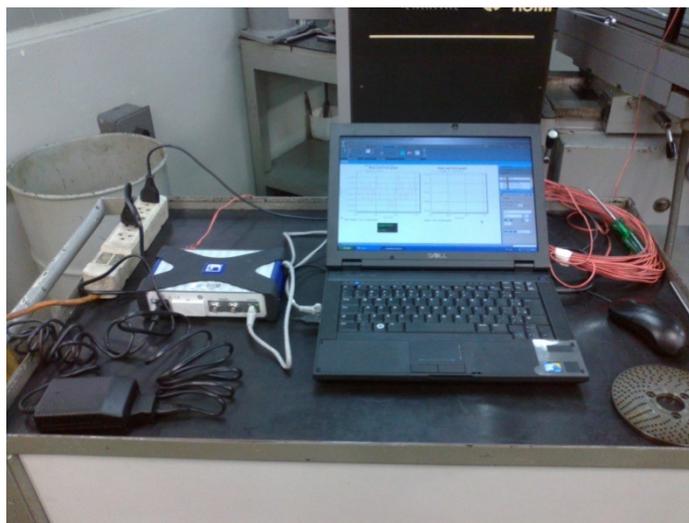


Figura 48: Sistema de aquisição e processamento de dados da calibração. Fonte: Dados da pesquisa.

Os ângulos de esterçamento da roda dinamométrica e a força transversal aplicada na calibração da roda dinamométrica, tiveram como critério de escolha os valores máximos de deslocamento das lâminas.

O valor máximo do ângulo de esterçamento e da força transversal de forma a não ultrapassar o pré-requisito de $2000 \mu\text{m}/\text{m}$ foi o ângulo de esterçamento 13° e força transversal de 7 kN. Então, assumiu-se uma variação do ângulo de esterçamento de 1° ao valor máximo,

escalonado de dois em dois graus a partir de um grau para o ângulo de esterçamento e a força máxima não ultrapassando 6 kN.

O ensaio estático permitiu, além da calibração, diagnosticar alguns fenômenos decorrentes do teste em questão, como por exemplo, a histerese do pneumático e a relaxação, fatos que obrigaram alterar o procedimento até se chegar ao descrito.

Como resposta da calibração, obtém-se uma curva como mostra a figura 49, com parâmetros de pressão de 1,85 bar, peso próprio e ângulo de esterçamento de 1°, onde uma avaliação com maior precisão das deformações nas três lâminas e a variação de força transversal, ambas em função do tempo decorrido de ensaio foi possível.

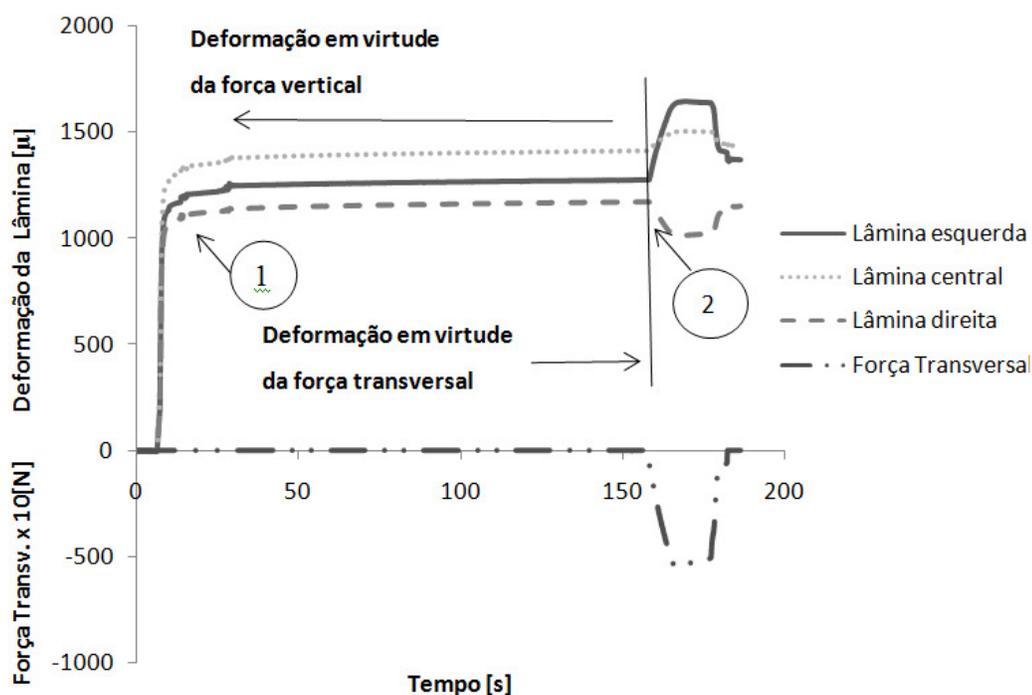


Figura 49: Exemplo de uma curva de calibração estática da roda dinamométrica. Fonte: Dados da pesquisa.

Com o sistema zerado e o pneu erguido, o processo inicia descendo a roda dinamométrica até o encontro da plataforma anti-atrito, quando nota-se no gráfico a deformação das três lâminas montadas conforme demonstra a figura 49.

No máximo da deformação das lâminas decorrente do carregamento vertical praticamente não há variação no tempo (ponto 1), porém logo após, a curva que antes era

praticamente vertical, se torna horizontal, o que aqui se refere ao tempo de estabilização, cento e cinquenta segundos, então ocorre o início da aplicação de força transversal (ponto 2), que na figura aparece com valor negativo apenas a título de apresentação desta. Neste ponto, existe o interesse em conhecer a curva de calibração estática propriamente dita, ou seja, a relação entre força transversal aplicada e a deformação das lâminas.

Como a montagem da roda tem três sensores de deslocamento linear, projetada desta maneira com caráter preventivo, uma deve ser selecionada como a referência de calibração estática, sendo este, o sensor de deslocamento linear interno, por se tratar da lâmina que mais deformação apresentou nos ensaios. A figura 50 ilustra a curva requerida da calibração estática, para o sensor selecionado. Foram coletados em média 700 pontos e para que se tenha confiabilidade nos testes de calibração, três repetições foram efetuadas, sendo duas delas colocadas na figura com o objetivo de ilustração do fenômeno.

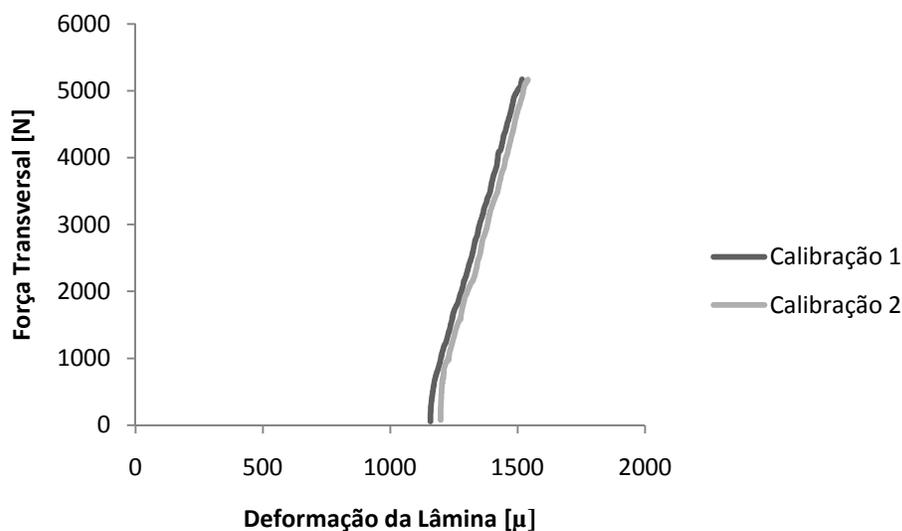


Figura 50: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, esterçamento 1° e pressão de inflação de 1,85 bar. Fonte: Dados da pesquisa.

Como existe a necessidade de se tarar a roda dinamométrica no início da calibração para se obter o tempo de estabilização de 150 s, a curva de calibração deve ser zerada, ou seja, deve se extrair a parcela de deformação da lâmina referente ao carregamento vertical, obtendo-se a figura 51.

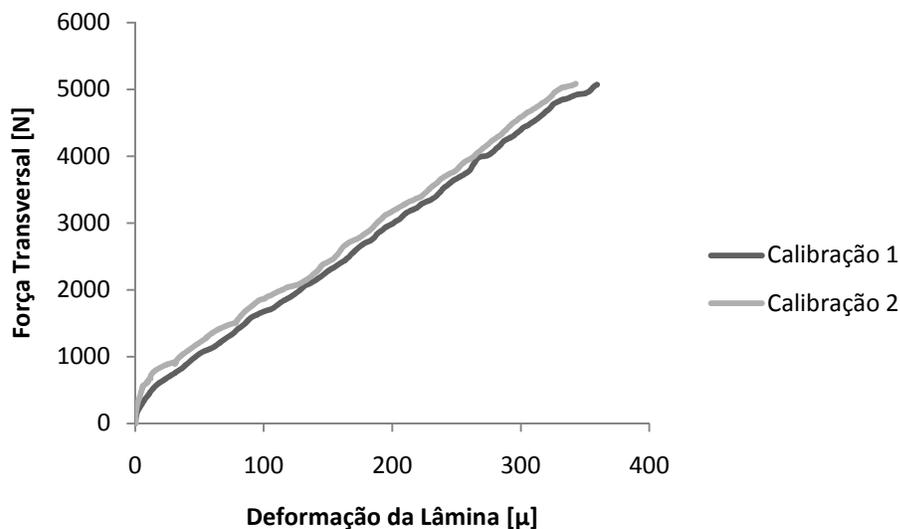


Figura 51: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, esterçamento 1° e pressão de inflação de 1,85 bar. Fonte: Dados da pesquisa.

Caso se utilize a segunda curva de calibração, os resultados dos ensaios do teste de campo também deverão receber o mesmo tratamento.

4.2.3 Procedimento experimental dos testes de campo.

Com a roda dinamométrica calibrada para todas as variações definidas, segue-se o procedimento para os testes de campo, descritos da seguinte maneira:

1 – Calibra-se a pressão de inflação do pneu desejada, de forma a se obter as três pressões, 1,85, 2,05 ou 2,25bars.

2 – Com o auxílio do sistema direcional calibrado anteriormente escolhe-se o ângulo de esterçamento do teste, de forma a se ter 1°, 3°, 5°, 9° e 13°, porém o esterçamento ocorre nas duas rodas direcionais, causando a convergência ilustrada na figura 52.

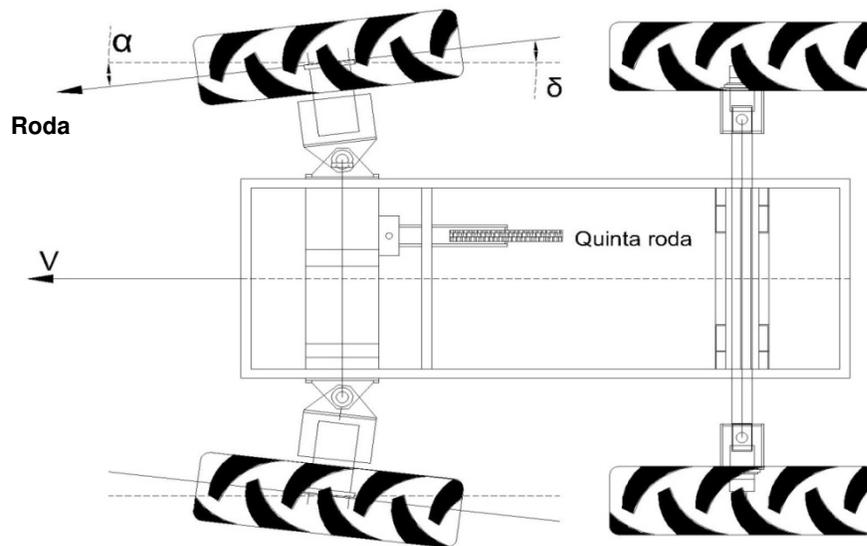


Figura 52: Esterçamento das duas rodas direcionais visando o aumentar a força transversal desenvolvida pelo pneu. Fonte: Dados da pesquisa.

O esterçamento da roda se dá com o intuito de deformar o pneu, ocorrendo então à força transversal desenvolvida nesta condição, de maneira a se constatar com a variação do esterçamento o comportamento desta força.

A fim de minimizar a mudança de trajetória do veículo em função deste esterçamento, a outra roda direcional do mesmo eixo também foi submetida ao mesmo ângulo de esterçamento a aquele sugerido na roda dinamométrica.

Com o objetivo de se verificar a alteração de trajetória causada pelos esterçamentos, uma quinta roda foi fixada ao chassi do veículo, próxima a roda dinamométrica, ilustrada na figura 53 e na figura 54.

A pista de teste teve variação na superfície de apoio, sendo asfalto a primeira, solo compactado sem cobertura a segunda, e solo compactado com cobertura a terceira.

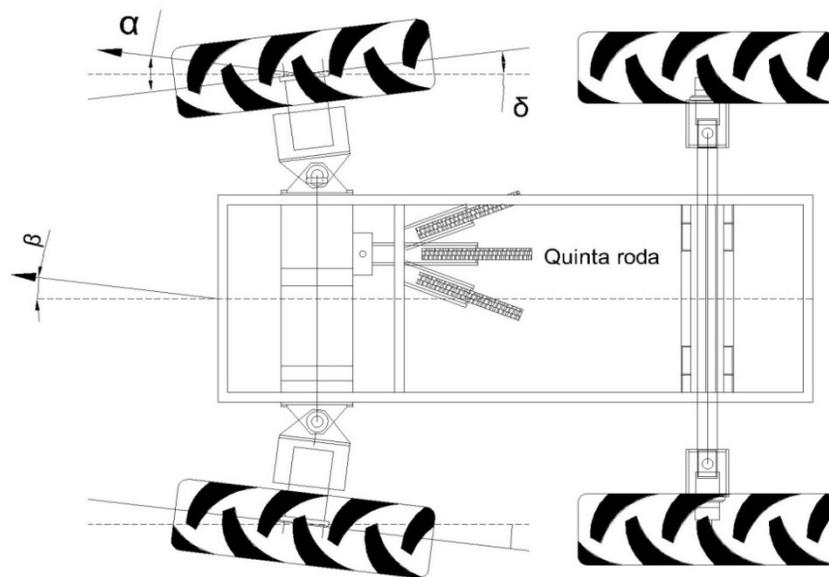


Figura 53: Instalação da roda auxiliar com o intuito de se verificar a trajetória do trator em condição do teste de campo. Fonte: Dados da pesquisa.



Figura 54: Fixação da quinta roda ao chassi do veículo. Fonte: Dados da pesquisa.

Nos testes realizados no asfalto não foi necessário cobrir o trajeto feito pela quinta roda com nenhum tipo de material mais duro, porém nos dois solos macios, uma pista de madeira foi montada a fim de se impedir interferências deste com a roda de medição, como ilustrado na figura 55.



Figura 55: Pista de apoio para a quinta roda. Fonte: Dados da pesquisa.

Além dos critérios descritos anteriormente, variou-se a carga vertical no eixo dianteiro, de maneira a se obter um incremento na roda de 2 kN. Para se conhecer mais sobre os pisos dos testes, foram realizadas medições de índice de cone e umidade, que serão apresentadas no capítulo de resultados, a figura 56 ilustra a medição de índice de cone.



Figura 56: Medição de índice de cone com auxílio de um penetrômetro. Fonte: Dados da pesquisa.

Como na calibração estática, para cada escolha de pressão de inflação do pneu, ângulo de esterçamento das rodas direcionais, piso de tráfego e carga vertical, foi efetuada três

passadas para se verificar a ocorrência de possíveis erros. O trajeto feito foi de aproximadamente 12 metros de comprimento, causando entre quatro e cinco voltas da roda dinâmométrica com velocidade média de 2,5 km/h. A figura 57 mostra de forma geral o ensaio feito no asfalto e o ensaio feito no solo com cobertura.



Figura 57: Testes de campo no asfalto e no solo agrícola. Fonte: Dados da pesquisa.

Por fim, a metodologia de coleta dos dados, se deu de forma análoga à escolhida na calibração. Com a roda dinâmométrica sem carga, tarou-se os sensores e então o veículo iniciou o movimento. A figura 58 ilustra uma das respostas obtidas do ensaio com o asfalto.

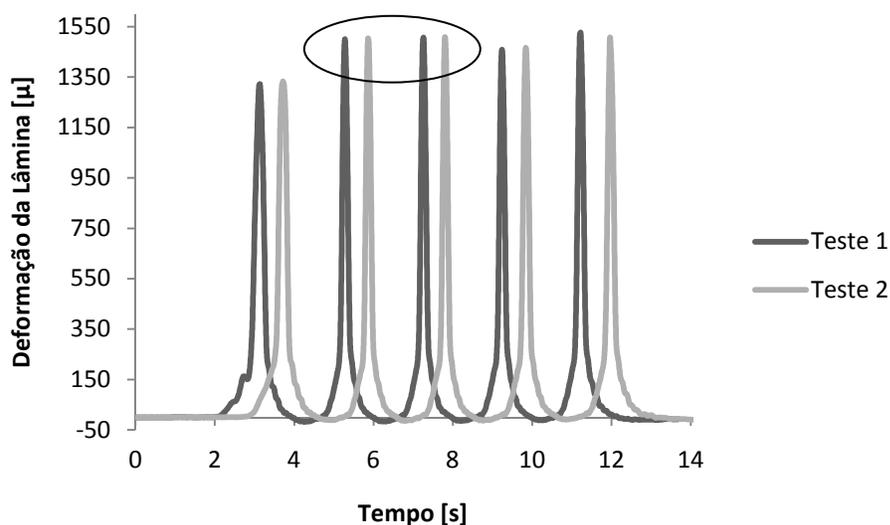


Figura 58: Exemplo de resposta do teste de campo, asfalto, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação do pneu de 1,85 bar e carga vertical com o peso próprio. Fonte: Dados da pesquisa.

Com mais de 850 pontos formando a curva de teste de campo, o ponto de deformação de interesse é o mais elevado, porém neste caso, têm-se cinco pontos, ou seja, cinco rotações

da roda dinamométrica. O primeiro e o último ponto não serão utilizados para a determinação da força transversal, sendo computados apenas os pontos intermediários.

De posse das deformações ocorridas na roda dinamométrica, pode-se com o auxílio da curva de calibração estática estimar a força desenvolvida pelo pneumático nas referidas condições, de forma a completar a tabela 1, que é um exemplo de uma das respostas obtidas de campo e da calibração.

Tabela 1: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento³ e pressão de inflação de 1,85 bar. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Superfície</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1 Deformação Máx.Giro2	1500,46	1488,03	1162,60	1104,28	1170,60	1167,29
2 Deformação Máx.Giro3	1505,37	1507,86	1153,05	1120,73	1153,50	1147,73
3 Média Simples	1502,92	1497,95	1157,83	1112,51	1162,05	1157,51
4 Média Final		1500,43		1135,17		1159,78
5 Força Transversal [N]		4502,42		0		206,83
6 Ângulo de esterçamento [°]		3,00		3,00		3,00
7 Ângulo da quinta roda [°]		0,05		0,01		0,06
8 Ângulo de Declive [°]		19,81		0		0,95

A tabela 1 tem nas linhas 1 e 2 as entradas dos valores de deformação do sensor coletados nos ensaios de campo para os três tipos de piso e duas repetições. A linha 3 indica a média simples entre os dois valores e a linha 4 calcula a média simples entre as duas repetições.

Com o valor da deformação final menos a deformação referente ao carregamento vertical, linha 5, e com a curva de calibração determina-se o valor de força transversal, como apontado na linha 6.

A linha 7 mostra o valor do ângulo de esterçamento das rodas direcionais durante o teste de campo, na linha 8 é inserido o valor do ângulo medido na quinta roda, mostrando a trajetória real seguida pelo trator. Com o valor do ângulo de convergência da roda dinamométrica menos o valor do ângulo verificado na quinta roda foi possível encontrar o

ângulo de deriva. Por fim, a linha 9 mostra o valor do ângulo de declive possível em função da força vertical imposta a roda dinamométrica e da força transversal desenvolvida.

Para o conhecimento do ângulo de declive máximo em função da força máxima transversal ocorrida nos testes, inclinou-se o veículo como ilustrado na figura 59. A força vertical indicada foi de 12,5 kN ou 14,5 kN e força transversal, aquela achada nos teste de campo juntamente com a calibração como mostra as equações (19).

$$R_d \cos(\Theta) = 12500 \qquad R_d \sin(\Theta) = F_{transversal} \qquad (19)$$

$$tg(\Theta) = \frac{\sin(\Theta)}{\cos(\Theta)} = \frac{\frac{F_{transversal}}{R_d}}{\frac{12500}{R_d}} = \frac{F_{transversal}}{12500}$$

As respostas para as três possibilidades de execução dos testes de campo juntamente com a calibração são apresentadas de tabela 2, que tem a sua metodologia construtiva descrita anteriormente e detalhada a seguir.

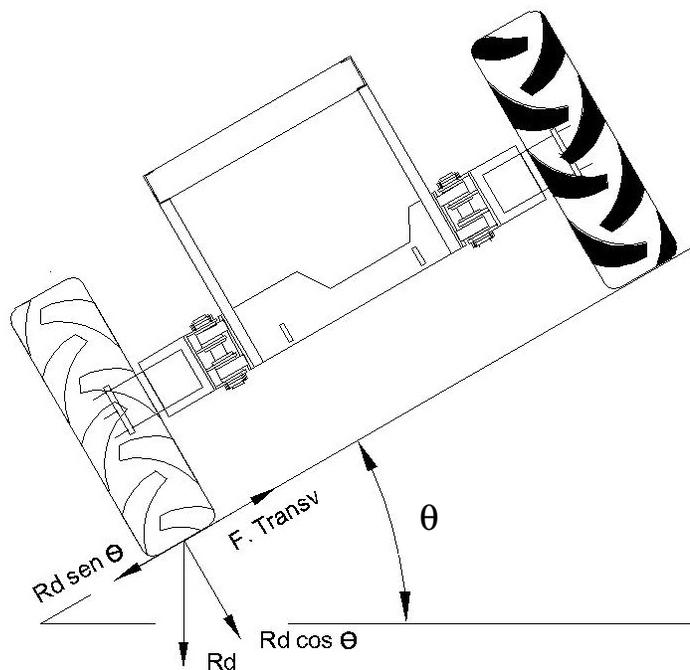


Figura 59: Diagrama de forças para o veículo de teste trafegando em plano inclinado. Fonte: Dados da pesquisa.

No capítulo a seguir são mostrados e discutidos os resultados obtidos das calibrações e dos ensaios de campo para todas as condições previstas, bem como um detalhamento dos dados da tabela 1.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados da calibração e testes de campo ocorridos com a roda dinamométrica para as diversas condições preestabelecidas, de maneira a se encontrar força máxima desenvolvida pelo pneu.

Com a determinação desta força é possível definir o ângulo máximo do declive que o terreno de tráfego da máquina poderá atingir, e qual o ângulo de esterçamento da roda necessário para eliminar a deriva de trajetória.

Inicialmente verificou-se a relação entre a força e a deformação ocorrida nas três lâminas instaladas no interior do pneumático durante a calibração da roda dinamométrica, de forma a se escolher a lâmina (sensor) com maior sensibilidade para a coleta dos dados, ou seja, para qualquer condição de teste de campo ou de calibração, a determinação da força transversal partirá do sensor escolhido, desde que a calibração deste e o teste tenham ocorrido na mesma condição de esterçamento, piso, pressão de inflação e força vertical.

A figura 60 ilustra o comportamento das três lâminas (sensores) durante a calibração da roda dinamométrica em uma mesma condição de ângulo de esterçamento, pressão de inflação e força vertical.

A lâmina selecionada foi a interna, em função de esta ter alcançado o maior valor de coeficiente angular durante todas as calibrações efetuadas em relação às outras duas lâminas, permitindo com isto, uma melhor precisão nos resultados. Como conjunto de lâminas forma um tripé no interior o pneumático, considera-se interna aquela alojada mais próxima ao flanco que esteja formando a bitola do trator da roda dinamométrica.

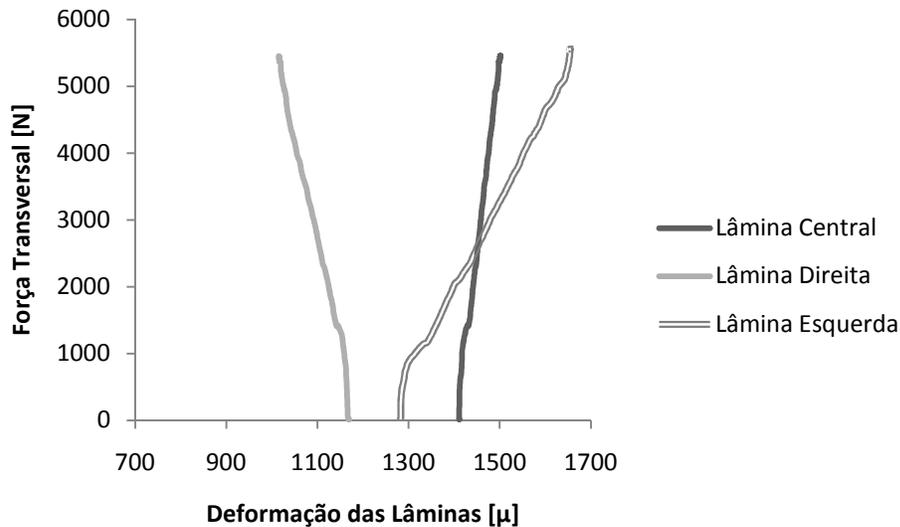


Figura 60: Escolha da lâmina utilizada para a coleta dos dados na análise dos resultados.

Fonte: Dados da pesquisa.

A lâmina selecionada foi a da esquerda, em função desta ter alcançado o maior valor de coeficiente angular durante todas as calibrações em relação às outras duas lâminas, permitindo com isto, uma melhor precisão nos resultados.

Os resultados das calibrações e dos testes de campo tiveram como variáveis a força vertical atuante sobre a roda dinamoétrica, podendo ser esta de 12,5 kN ou 14,5 kN, a pressão de inflação do pneu de 1,85, 2,05 e 2,25 bars, com ângulos de esterçamentos de 1°, 3°, 5°, 9° e 13°, ocorrendo em três pisos de tráfego, asfalto, terra compactada sem cobertura e terra compactada com cobertura. A seguir o primeiro resultado com as variáveis independentes.

5.1 Calibração estática e teste de campo com força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.

5.1.1 Para ângulo de esterçamento de 1°.

A figura 61 ilustra duas repetições da calibração estática da roda dinamoétrica nas condições especificadas. Observa-se que em ambas o coeficiente angular da reta tem o mesmo valor, acarretando em uma equivalência entre os valores, podendo-se selecionar para a determinação da força transversal em função da deformação da lâmina a média simples entre elas.

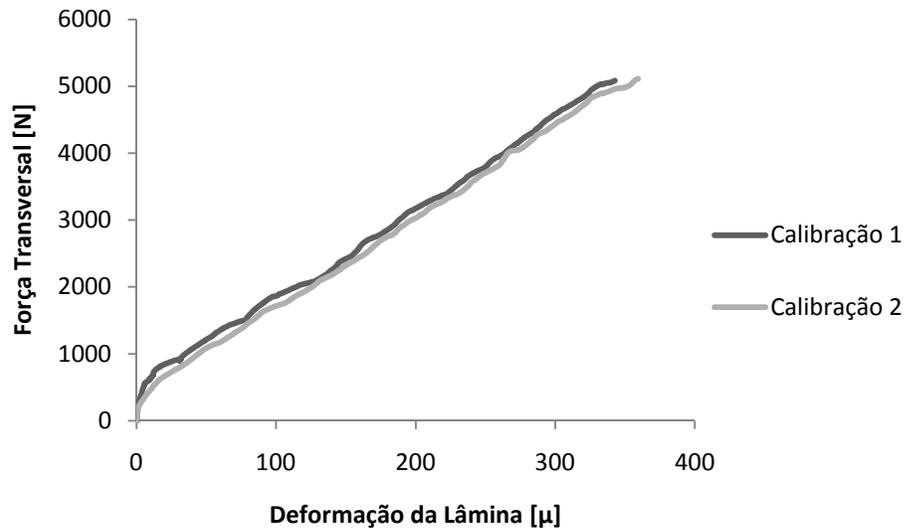


Figura 61: Duas repetições da calibração da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

O primeiro teste de campo se deu sobre o piso com asfalto, com velocidade de 2,5 km/h, adquirida através da angulação da placa de acionamento da bomba hidráulica de fluxo variável, que transmite a vazão para os motores de roda do veículo. A velocidade pode ser considerada a mesma para todos os ensaios uma vez que o ângulo da placa foi mantido constante.

A figura 62 relaciona o resultado da deformação da lâmina interna da roda dinamométrica em movimento rotativo em relação ao tempo de teste. Duas repetições, intituladas de Teste 1 e Teste 2 foram mostradas na figura com o intuito de se verificar a repetibilidade do ensaio.

Para todos os testes futuros, uma nomenclatura foi adotada, quando se tratar de piso com asfalto, os teste terão índices 1 e 2, quando o teste ocorrer em piso macio sem cobertura, os índices serão 3 e 4 e por fim, quando o piso for macio com cobertura os índices serão 5 e 6.

No tempo em zero segundo, com o trator parado, a roda dinamométrica foi posicionada de forma a fazer com que os sensores não recebam nenhum carregamento, mostrando então deformação zero.

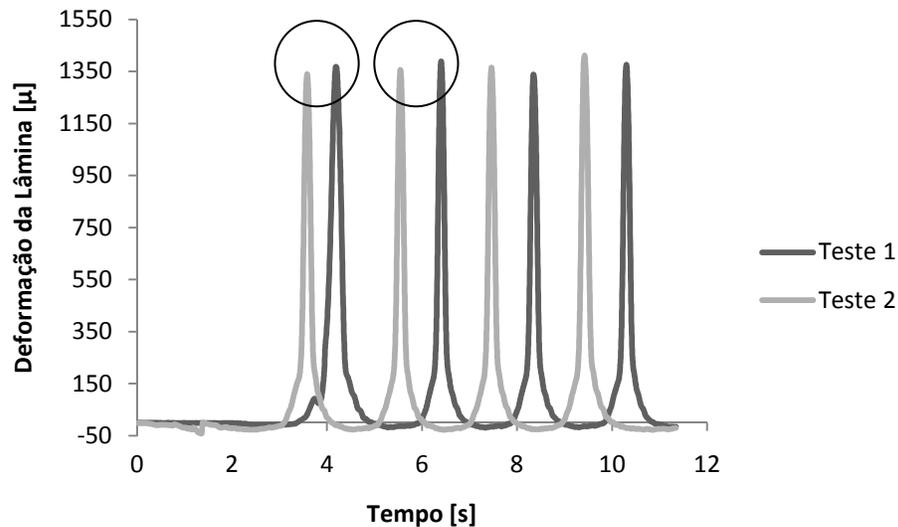


Figura 62: Duas repetições do teste de campo da roda dinamométrica, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 1° e pressão de inflação de 1,85 bar. Fonte: Dados da pesquisa.

Com o movimento do veículo e a rotação da roda, em aproximadamente três segundos, as lâminas receberam a ação de uma força radial devido ao peso da máquina e a ação de uma força transversal devido à convergência das rodas do eixo dianteiro, sendo uma delas a roda dinamométrica.

O instante de máxima deformação ocorre quando o contato do pneu com o solo coincide integralmente com o local de montagem das lâminas. De posse deste valor de deformação da lâmina e com o auxílio do gráfico de calibração da roda dinamométrica, encontra-se o valor da força transversal desenvolvida pelo pneu na condição proposta.

Na figura 63 existem quatro deformações máximas ocorridas durante o teste em cada repetição. Para a determinação da força transversal apenas os dois valores intermediários foram utilizados, assinalados na figura com uma circunferência, sendo o primeiro e o último valor, correspondentes ao início e ao fim do ensaio, excluídos pelo fato do trator estar em processo de aceleração ou desaceleração, fato que interfere com a deformação do pneu.

No mesmo instante da ocorrência da deformação máxima foi possível identificar no sistema de aquisição o ângulo de esterçamento da quinta roda, determinando-se então, o ângulo de deriva como a diferença entre o ângulo de esterçamento da roda dinamométrica e o ângulo da quinta roda.

Para a mesma força vertical, pressão de inflação e ângulo de esterçamento, apenas alterando o tipo de piso, de asfalto para terra compactada sem cobertura e de asfalto para terra compactada com cobertura, obteve-se os resultados ilustrados nas figuras 63 e 64.

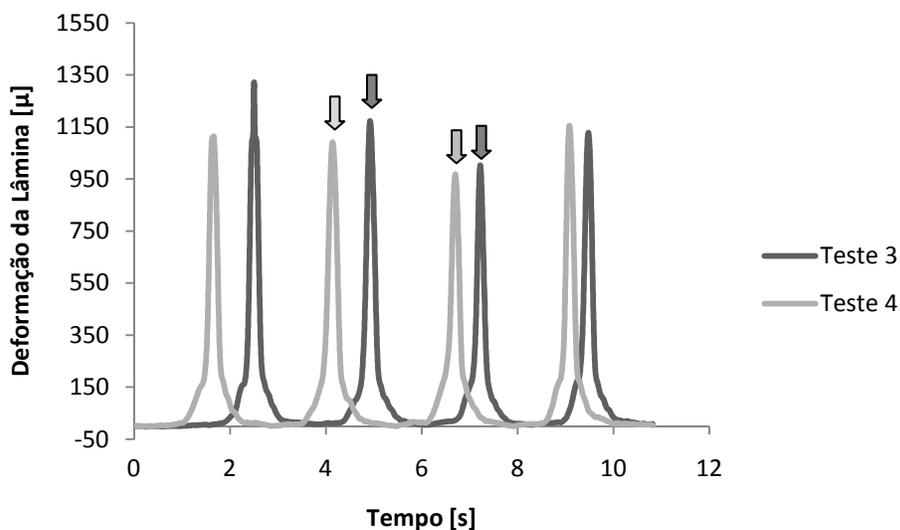


Figura 63: Duas repetições do teste de campo da roda dinamométrica, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Uma primeira comparação entre os resultados revela que os valores de deformação apresentados para o solo compactado sem e com cobertura apresentaram uma grande variação para cada passada da roda, assinalados com uma seta na figura 63, fato que não ocorreu no asfalto, isto devido à variabilidade do comportamento mecânico do solo durante todo o percurso do teste.

A variabilidade no comportamento mecânico do solo pode ser observada na figura 64, onde a deformação da lâmina no terceiro giro da roda, supera a deformação da lâmina do segundo giro, sendo que na figura 63 o comportamento é contrário, caracterizando que o pneumático é sensível ao tipo de piso de tráfego.

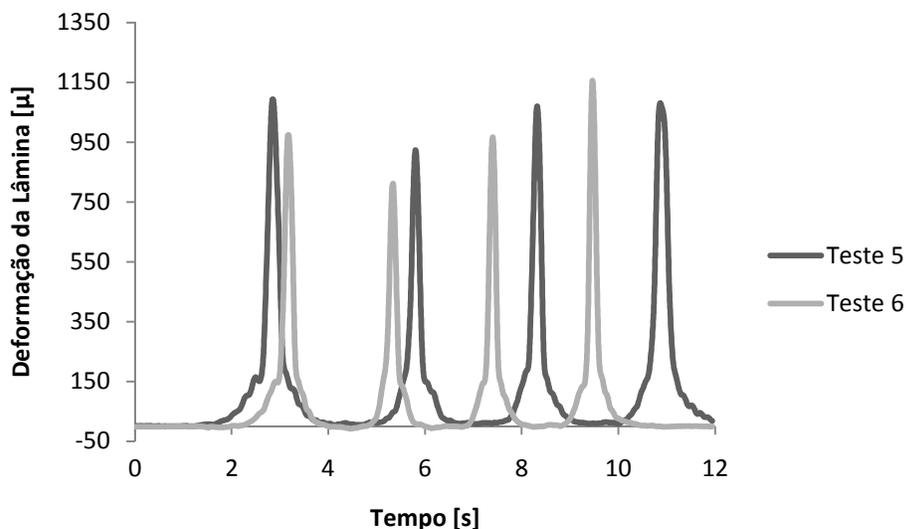


Figura 64: Duas repetições do teste de campo da roda dinamométrica, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 1° , pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Uma semelhança entre os três testes de campo com relação à deformação da lâmina se encontra na partida ou na frenagem do veículo, portanto, na primeira e na última deformação máxima, onde é possível visualizar a existência da variação na deformação da lâmina em relação às outras duas intermediárias, podendo-se afirmar que a deformação do pneu é sensível a variação de força longitudinal, fato que será investigado a seguir.

Nota-se também, que entre os registros do primeiro teste com relação ao segundo, todas as deformações se mantêm praticamente iguais, de modo que, se no primeiro teste ocorreu uma queda no valor de deformação, no segundo teste a queda também ocorre, porém, confirmando a repetibilidade dos testes.

Apesar das diferenças salientadas, pode-se definir que os testes de campo apresentados tiveram equivalência entre os seus valores de interesse, permitindo que através de uma média simples sejam obtidos os valores de máxima de deformação para cada condição.

As respostas para as três possibilidades de execução dos testes de campo juntamente com a calibração são apresentadas de tabela 2, que tem a sua metodologia construtiva descrita anteriormente na metodologia.

Tabela 2: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx.Giro 2	1356,00	1388,38	1172,36	1002,60	923,30	1069,78
Deformação Máx.Giro 3	1365,18	1337,03	1091,44	968,04	811,40	966,58
Média Simples	1360,59	1362,71	1131,90	985,32	867,35	1018,18
Média Final	1361,65		1058,61		942,77	
Deformação de Tara	1173,00		945,00		945,00	
Força Transversal [N]	2540,00		1527,00		0,00	
Ângulo de esterçamento [°]	1,00		1,00		1,00	
Ângulo 5° roda [°]	0,10		0,14		0,06	
Ângulo de Declive [°]	11,49		6,97		0,00	

5.1.2 Para ângulo de esterçamento de 3°.

A figura 65 ilustra a calibração da roda dinamométrica, onde no início desta, trecho circulado, uma variação nos pontos colhidos é claramente diferenciada do restante dos pontos, isto se deve pelo atrito estático causado pela plataforma anti-atrito do aparato de calibração da roda.

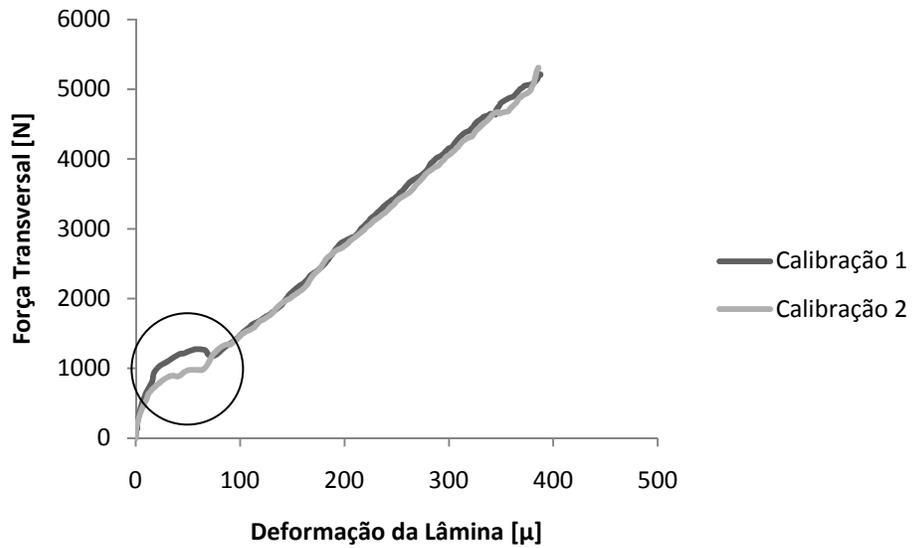


Figura 65: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

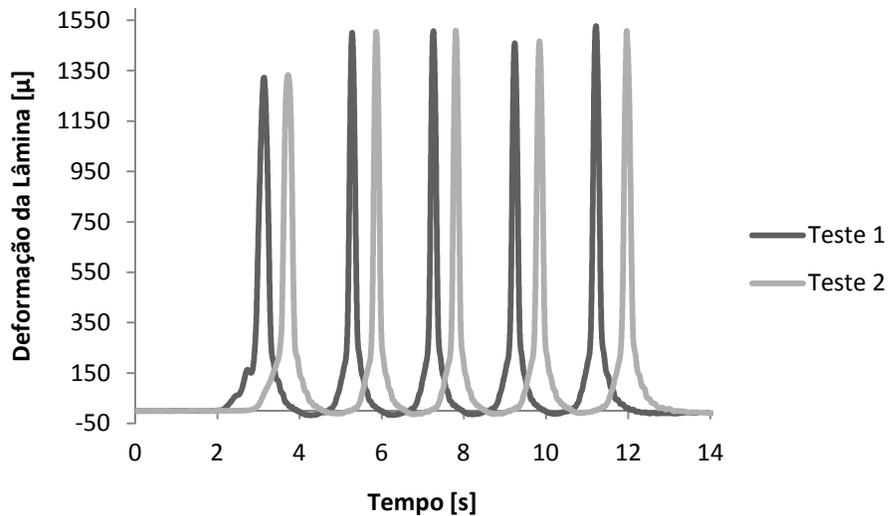


Figura 66: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

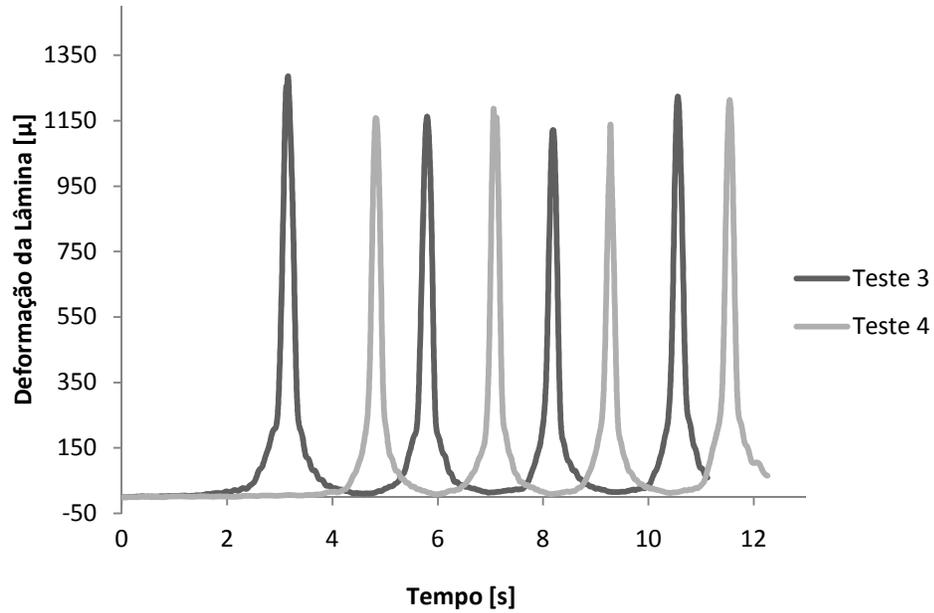


Figura 67: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 3° , pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

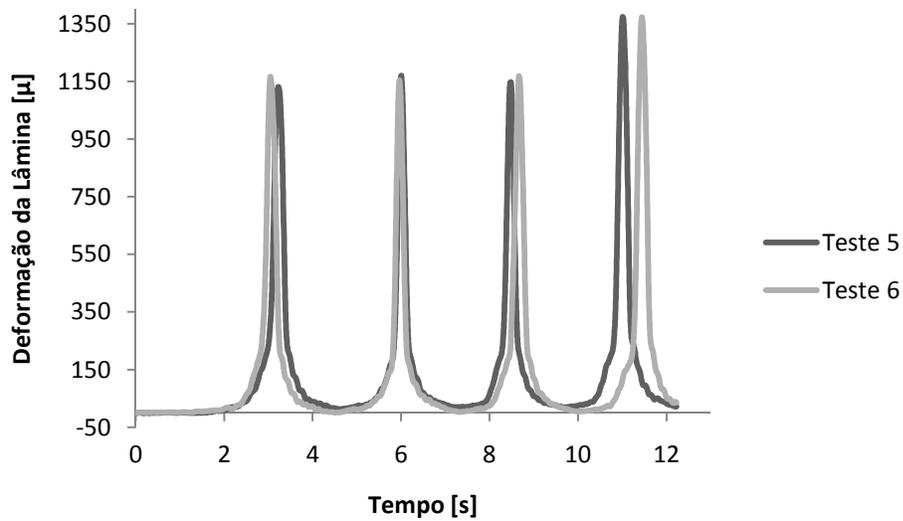


Figura 68: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 3° , pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Com o auxílio da tabela 3, pode-se verificar que o aumento do ângulo de esterçamento aumentou a força transversal do pneu, passando de 2540,00 N para 4123,00 N, um aumento de força de aproximadamente 60 %, portanto permitindo identificar que o aumento do ângulo de esterçamento aumenta a força transversal gerada pelo pneu.

Tabela 3: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx. Giro 2	1500,46	1488,03	1162,60	1104,28	1170,60	1167,29
Deformação Máx. Giro 3	1505,37	1507,86	1153,05	1120,73	1153,50	1147,73
Média Simples	1502,92	1497,95	1157,83	1112,51	1162,05	1157,51
Média Final	1500,43		1135,17		1159,78	
Deformação de Tara	1173,00		945,00		945,00	
Força Transversal [N]	4123,00		2395,00		2711,15	
Ângulo de esterçamento [°]	3,00		3,00		3,00	
Ângulo 5° roda [°]	0,10		0,01		0,62	
Ângulo de Declive [°]	18,26		10,85		12,24	

5.1.3 Para ângulo de esterçamento de 5°.

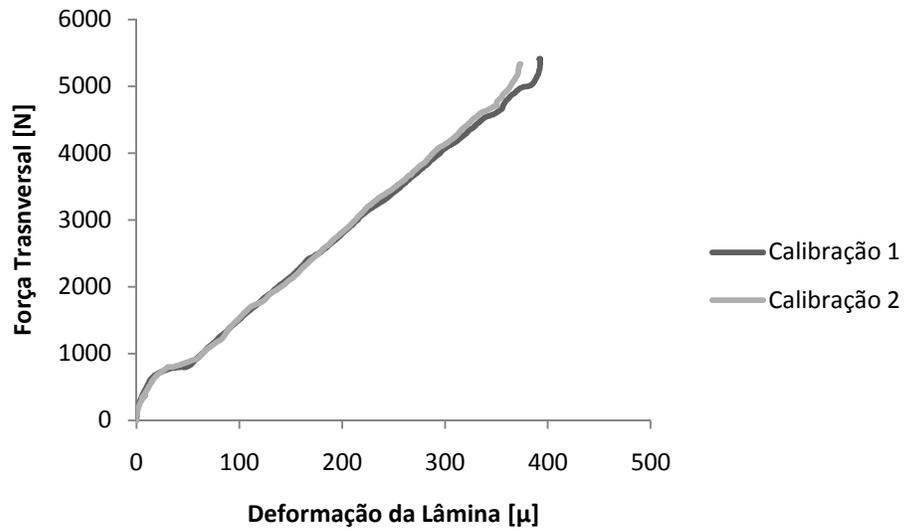


Figura 69: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

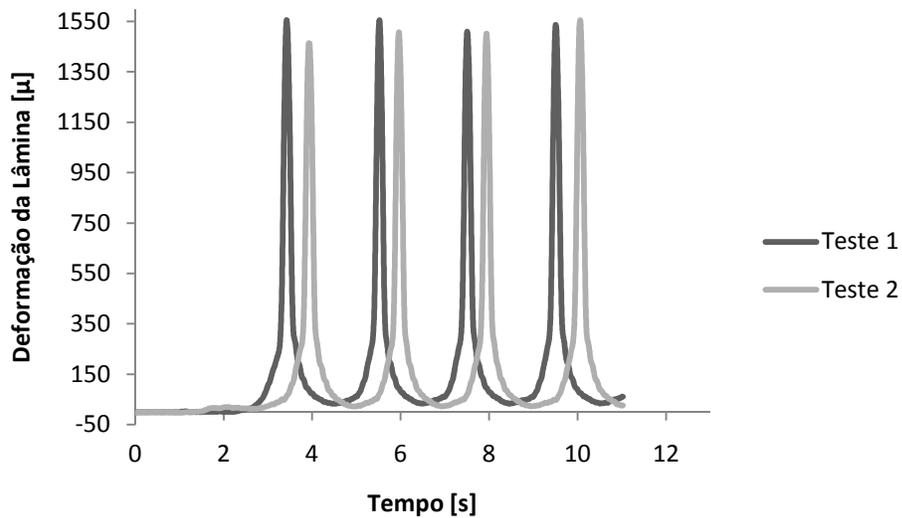


Figura 70: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

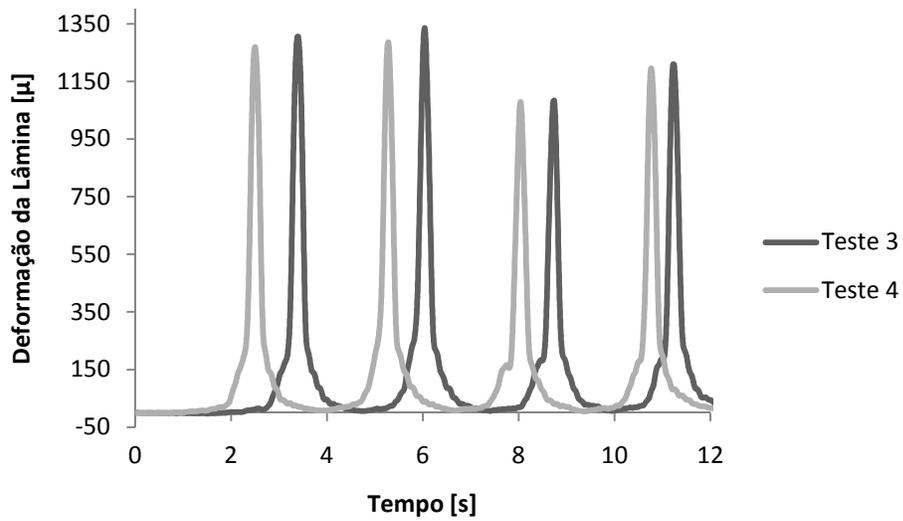


Figura 71: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

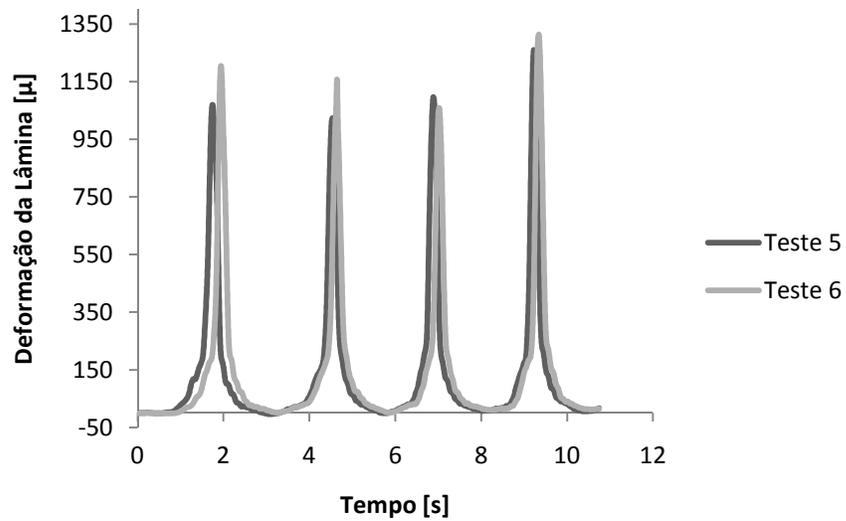


Figura 72: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
<i>Teste</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx. Giro 2	1555,52	1506,65	1286,20	1334,63	1023,55	1096,64
Deformação Máx. Giro 3	1509,96	1502,33	1061,40	1078,82	1157,42	1058,87
Média Simples	1532,74	1504,49	1173,80	1206,73	1090,49	1077,76
Média Final	1518,62		1190,26		1084,12	
Deformação de Tara	1173,00		945,00		945,00	
Força Transversal [N]	4526,00		3214,00		1837,00	
Ângulo de esterçamento [°]	5,00		5,00		5,00	
Ângulo 5° roda [°]	0,10		0,01		0,62	
Ângulo de Declive [°]	19,91		14,42		8,36	

De forma análoga aos testes anteriores, a força transversal manteve-se crescente com o aumento do ângulo de esterçamento, independentemente do tipo de piso.

5.1.4 Para ângulo de esterçamento de 9°.

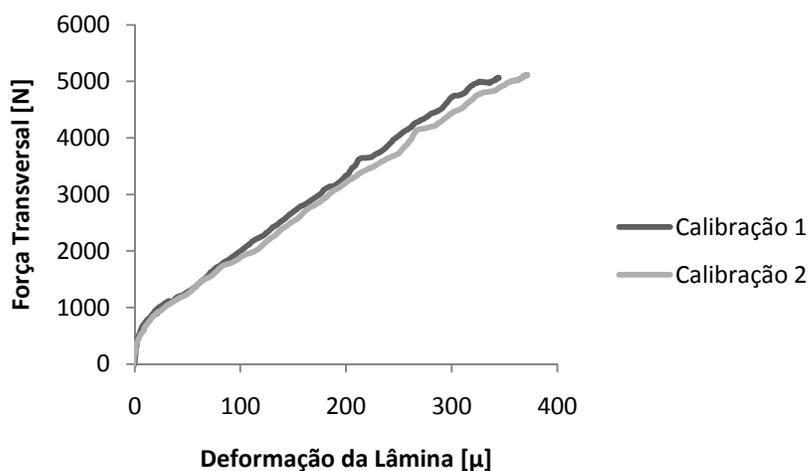


Figura 73: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

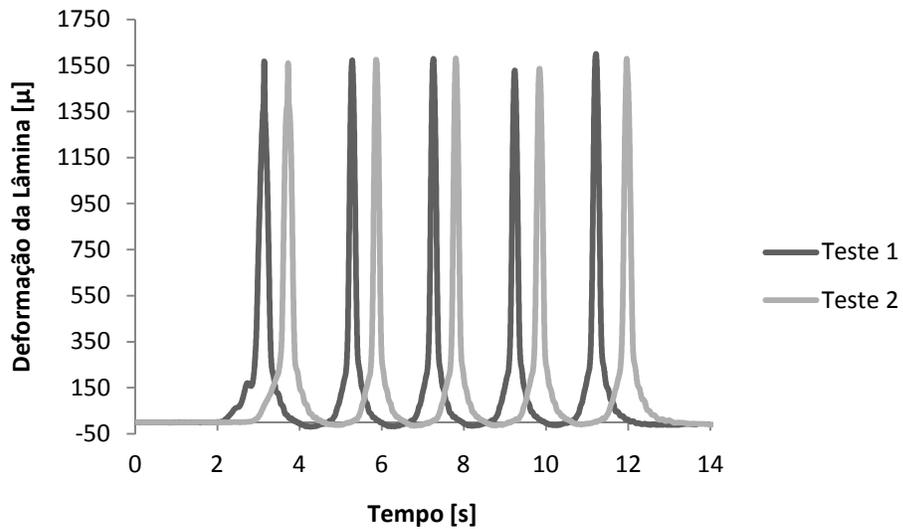


Figura 74: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

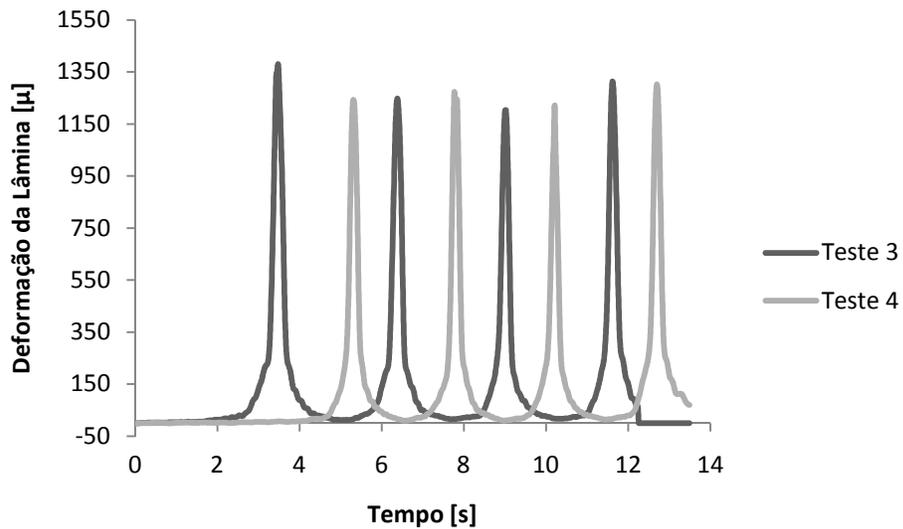


Figura 75: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

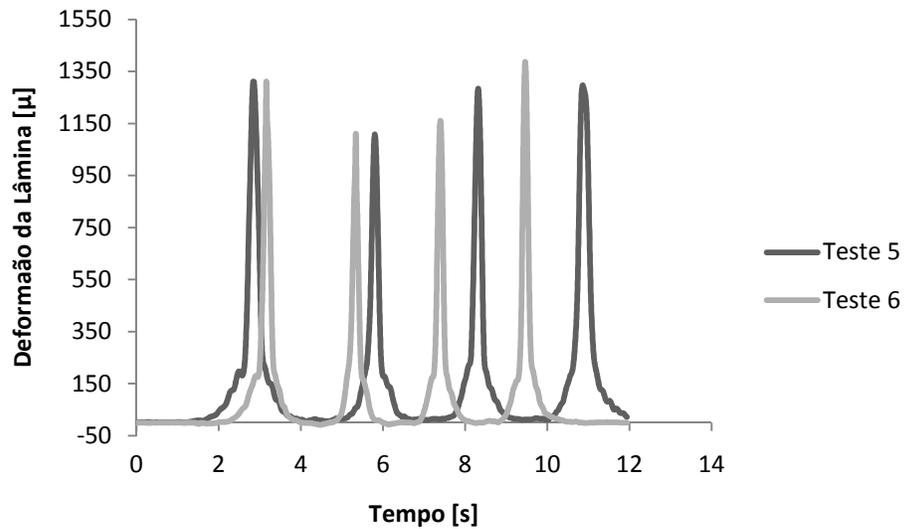


Figura 76: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 5: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 9°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
<i>Teste</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx. Giro 2	1572,48	1578,20	1247,47	1202,54	1106,50	1159,89
Deformação Máx. Giro 3	1559,46	1580,24	1272,85	1221,36	1107,96	1283,74
Média Simples	1565,97	1579,22	1260,16	1211,95	1107,23	1221,82
Média Final	1572,60		1236,06		1164,52	
Deformação de Tara	1173,00		945,00		945,00	
Força Transversal [N]	5338,00		3893,00		2943,00	
Ângulo de esterçamento [°]	9,00		9,00		9,00	
Ângulo 5° roda [°]	0,02		0,05		0,01	
Ângulo de Declive [°]	23,13		17,30		13,25	

O valor de força transversal continua subindo com o aumento do ângulo de esterçamento para os três pisos, porém já não sobe com a mesma proporção que a ocorrida com valores menores de ângulo de esterçamento.

5.1.5 Para ângulo de esterçamento de 13°.

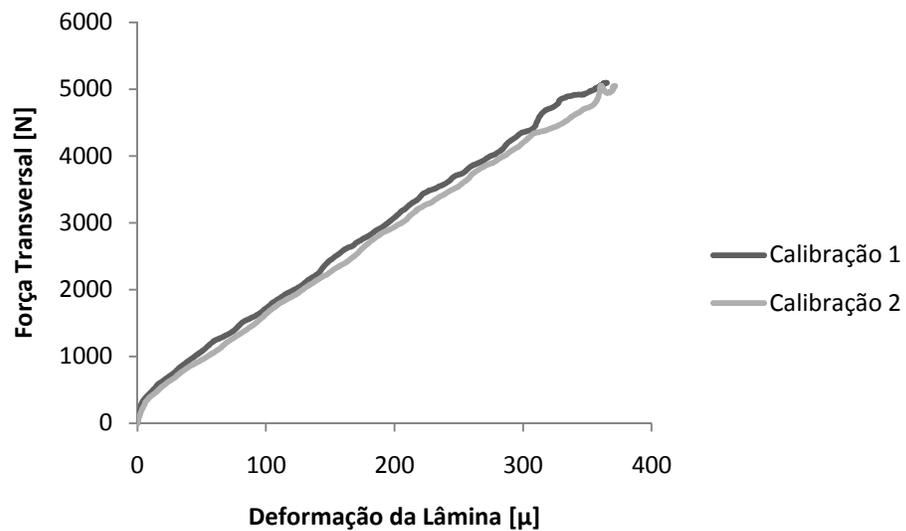


Figura 77: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

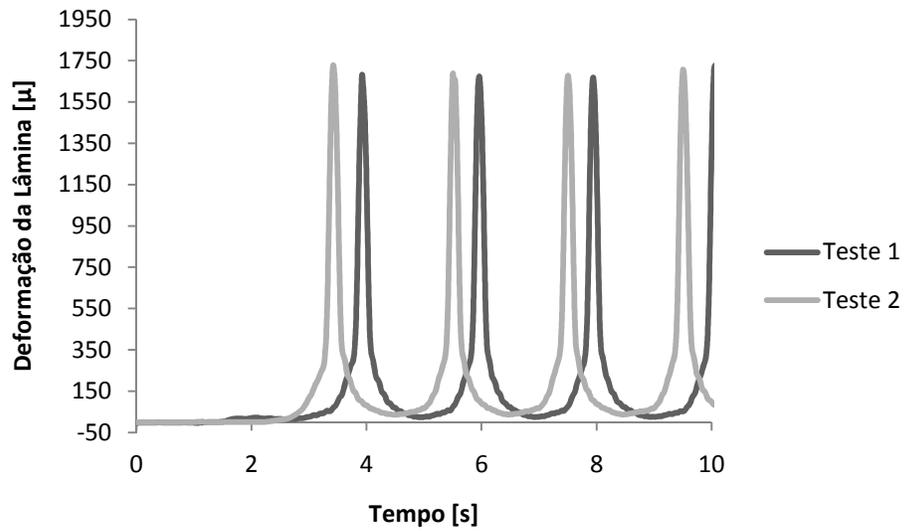


Figura 78: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

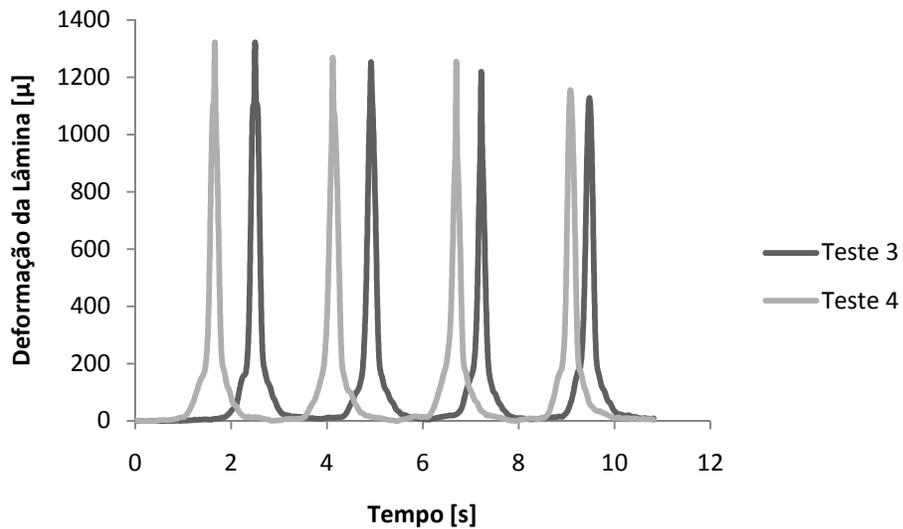


Figura 79: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

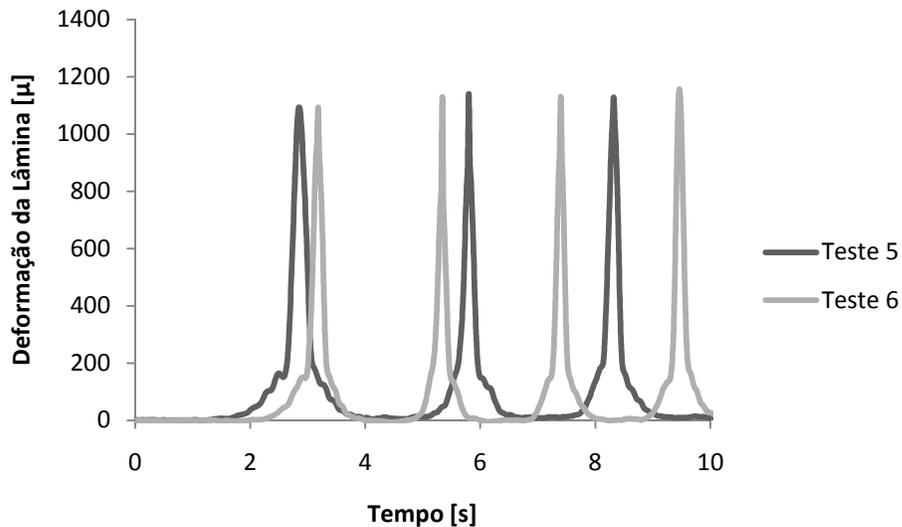


Figura 80: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 6: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 13°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teste</i>						
Deformação Máx. Giro 2	1628,36	1642,17	1267,20	1254,00	1189,23	1180,23
Deformação Máx. Giro 3	1674,05	1669,25	1252,50	1219,00	1180,45	1188,74
Média Simples	1651,21	1655,71	1259,85	1236,50	1184,84	1184,49
Média Final	1653,46		1248,18		1184,66	
Deformação de Tara	1173,00		945,00		945,00	
Força Transversal [N]	6105,00		3854,00		3053,00	
Ângulo de esterçamento [°]	13,00		13,00		13,00	
Ângulo 5° roda [°]	0,07		0,06		0,08	
Ângulo de Declive [°]	26,03		17,14		13,73	

A força transversal mantém o mesmo comportamento de todos os testes anteriores, aumentando com a variação do ângulo de esterçamento. Uma análise mais minuciosa em função dos resultados de todas as calibrações e de todos os testes de campo é apresentada no item 5.1.6.

5.1.6 Análise dos resultados gerais com força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.

Com os resultados apresentados na condição de carregamento vertical de 12,5 kN, pressão de inflação do pneu de 1,85 bar, ângulos de esterçamento de 1°, 3°, 5°, 9° e 13°, três pisos distintos, pode-se fazer uma avaliação a partir da grandeza alcançada pelas forças transversais em cada circunstancia descrita.

Com o auxílio da tabela 7, que apresenta um resumo geral dos resultados, destacando a força transversal, o ângulo de esterçamento, o tipo de piso, a pressão de inflação e a força vertical constante têm-se.

Tabela 7: Resultado da força transversal para cada piso de teste variando-se o ângulo de esterçamento para a condição de força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.

Fonte: Dados da pesquisa.

Pressão [bar]	δ [°]	Fz [kN]	Fy [N] Asfalto	Fy[N] c/ Cobertura	Fy[N] s/ Cobertura
1,85	1	12,5	2540	1527	0
1,85	3	12,5	4123	2395	2711
1,85	5	12,5	4526	3214	1837
1,85	9	12,5	5338	3893	2943
1,85	13	12,5	6105	3854	3053

O aumento da força transversal em qualquer um dos pisos de teste se deve ao aumento do ângulo de esterçamento. Analisando-se o ângulo de deriva causado pelo aumento da força transversal, verificou-se que, os ângulos medidos pela quinta roda registraram valores inferiores a 0,14°, podendo-se considerar que o ângulo de deriva é o próprio ângulo de esterçamento da roda dinamométrica uma vez que, o chassi da máquina não variou a sua trajetória, como ilustra a figura 81.

Um valor de força transversal para o piso com solo compactado com cobertura (2711N), como mostrado na tabela 7, surge precocemente quando o ângulo de esterçamento é de três graus, apesar das repetições apresentarem este valor como real, ele não faz sentido no contexto geral dos testes, fato que se deve provavelmente ao tipo de piso, desta maneira este valor terá consideração especial nas análises a seguir.

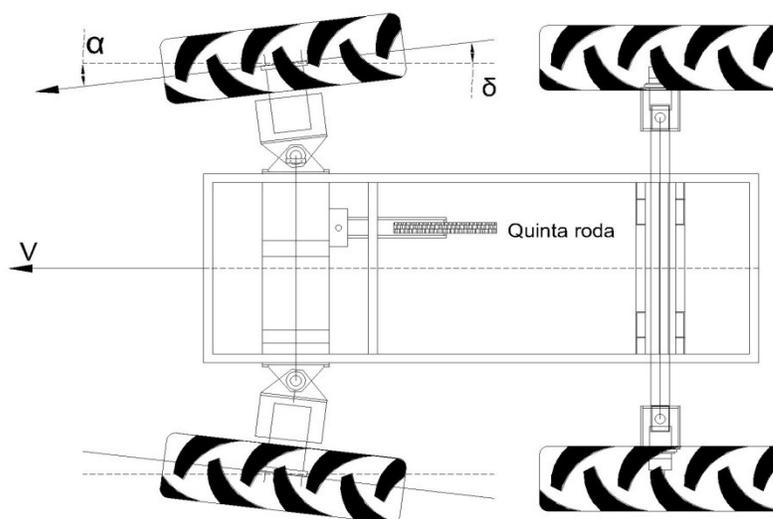


Figura 81: Relação entre o ângulo de esterçamento das rodas direcionais e o ângulo de deriva causado pela força transversal desenvolvida pelo pneu. Fonte: Dados da pesquisa.

Para uma análise mais completa, dois dados sobre o piso com solo compactado sem cobertura e com cobertura foram extraídos dos ensaios.

A tabela 8 ilustra para quatro amostras de solo retiradas a uma profundidade da superfície de 0,25 m os valores de teor de umidade e de índice de cone registrados.

Tabela 8: Resultado das medidas de teor de umidade do solo e índice de cone da superfície de terra compactada com cobertura e sem cobertura. Fonte: Dados da pesquisa.

	Sem cobertura		Com cobertura	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
Teor de umidade do solo [%]	27	20	28	29
IC [kPa]	901	1188	846	791

Com posse dos dados de força transversal e o ângulo de deriva é possível avaliar o nível de interação entre as duas grandezas através da figura 82, ilustrando que o aumento do ângulo de esterçamento propicia um aumento na força transversal desenvolvida pelo pneu, fato descrito anteriormente, porém com a figura é possível constatar a variação na trajetória que esta força causa, pois o aumento desta se dá com o aumento do ângulo de deriva.

Observa-se também que o piso de tráfego tem grande influência no potencial do pneu em deformar, pois o comportamento da força transversal se diferencia para cada condição imposta de teste de forma evidente. Nota-se que parcela da deriva nas superfícies macias não é decorrente da deformação do pneu, pois o valor de força transversal diminui para o mesmo ângulo, então ocorre cisalhamento na superfície do solo ou o escorregamento do pneu sobre a cobertura.

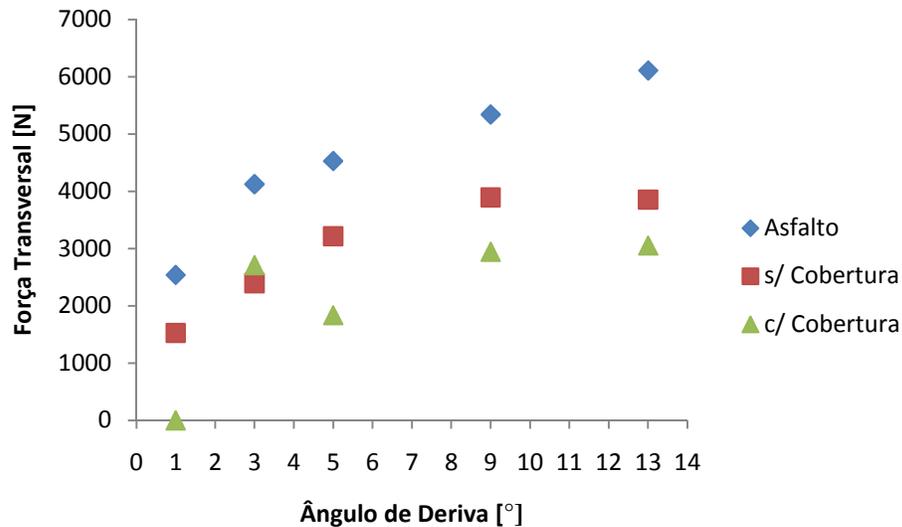


Figura 82: Variação da força transversal do pneu em relação ao aumento do ângulo de deriva para três condições diferentes de piso. Fonte: Dados da pesquisa.

Para o maior ângulo de deriva, a força transversal tem valores variando de 6105 N no piso de asfalto para um valor de 3053 N no solo compactado com cobertura, porém entre os solos compactados, a variação não se dá de forma substancial quanto na última comparação, variando o valor de 3053 para 3854 N.

Analogamente pode-se investigar o ganho do ângulo de declive proporcionado para cada tipo de piso com o seu respectivo ângulo de deriva, ilustrado na figura 83, que de antemão sabe-se, terá o mesmo comportamento ocorrido com a força transversal.

Com os resultados obtidos de ângulo de declive para os três pisos de teste, pode-se mensurar a interferência causada pelo tipo de solo na ação do pneu. Evidencia-se que o aumento da resistência mecânica do piso de teste tem grande importância para que o pneu desenvolva força transversal, nota-se que treze graus de deriva, o maior ângulo de declive desenvolvido foi na superfície mais dura, ocorrendo para a mais macia, neste caso a terra compactada com cobertura, um valor de declive inferior.

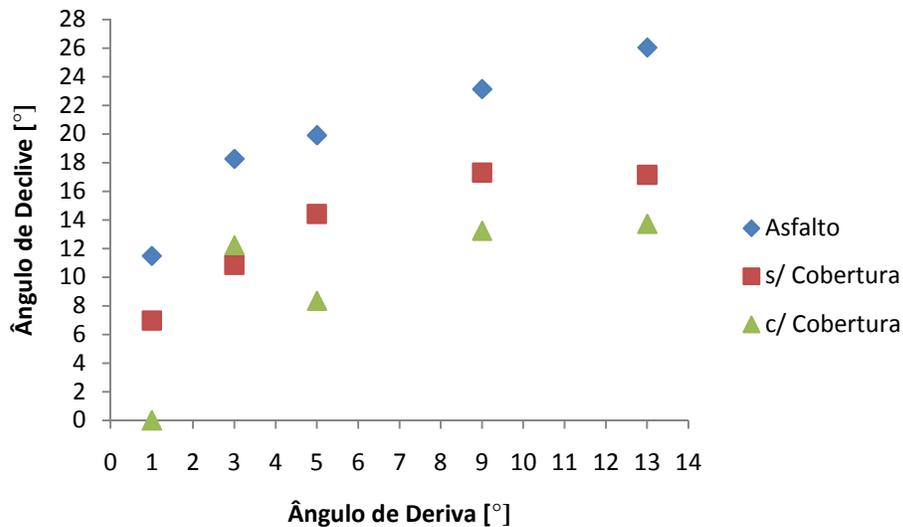


Figura 83: Variação do ângulo de declive proporcionado pela força gerada pelo pneu em relação ao aumento do ângulo de deriva para três condições diferentes de piso. Fonte: Dados da pesquisa.

Para se quantificar o grau de influência do tipo do piso de tráfego no desempenho do pneu, adota-se como 100 % o valor de 6150 N, que neste caso é o valor máximo de força transversal encontrado nos testes de campo. Comparando este valor aos valores encontrados na mesma condição de ângulo de deriva nos dois tipos de piso macio, conclui-se que o valor sofre queda da força transversal na ordem de 36,8% e de 50% com a respectiva diminuição da resistência mecânica.

O comportamento do pneu para os diversos ângulos de deriva estudados são ilustrados na figura 84, nota-se que para o primeiro ângulo de deriva não houve registro de força transversal para solo compactado com cobertura e mostra que ao se alterar o piso da condição rígida para a condição macia em qualquer ângulo de deriva, ocorre uma perda no desempenho do pneu. Para o ângulo de deriva de três graus, ocorre uma força transversal no piso maior no piso com cobertura do que o piso sem cobertura, fato incomum uma vez que para todos os outros ângulos de deriva não ocorrem, sugerindo uma alteração na resistência do solo neste teste, logo o tipo de superfície tem influência significativa na eficiência do pneu em gerar força transversal com o objetivo de se obter componente reativa a força peso em terrenos inclinados.

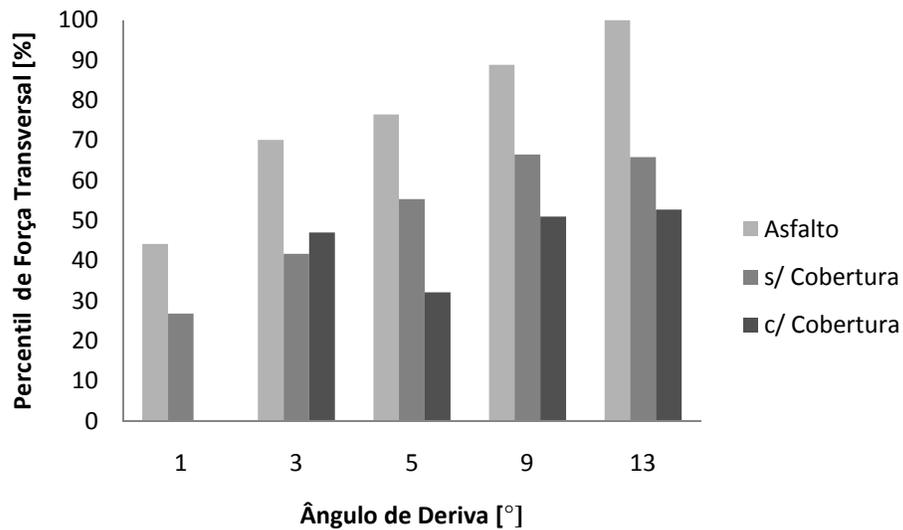


Figura 84: Interferência do tipo de pavimento de tráfego no declive obtido pela geração de força transversal do pneu. Fonte: Dados da pesquisa.

Após comparar o desempenho do pneu nos diferentes tipos de superfície de tráfego, uma nova análise é feita com o intuito de se investigar o grau de interferência na deformação lateral do pneu pelo aumento da pressão de inflação.

Para tanto, a metodologia aplicada para as condições impostas anteriormente, foi mantida, porém alterando-se a pressão de inflação de 1,85 bar para 2,25 bars.

Sendo os valores obtidos nos próximos testes a seguir conclusivos com ângulos de esterçamento de 5°, optou-se em eliminar os testes com os ângulos de 9° e 13° das análises.

5.2 Calibração estática e teste de campo com força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 2,25 bars.

5.2.1 Para ângulo de esterçamento de 1°.

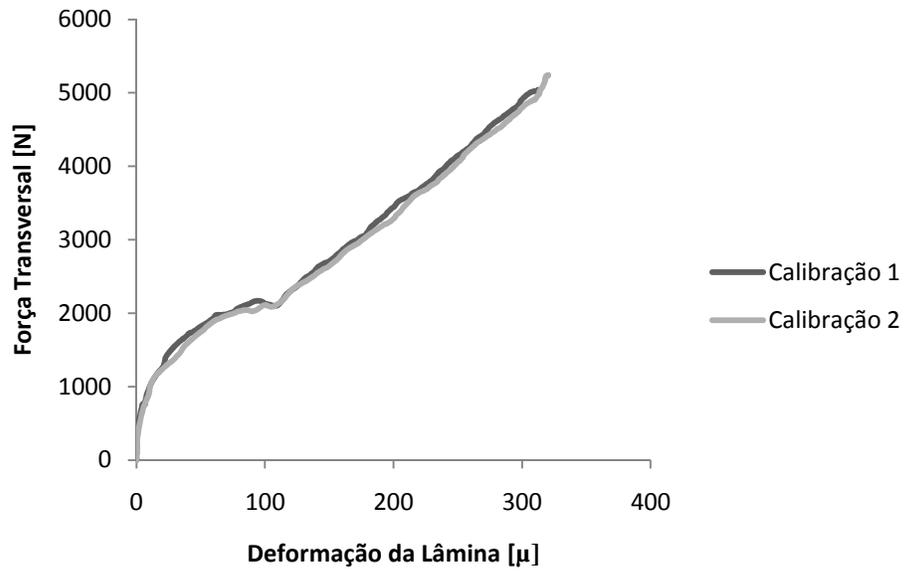


Figura 85: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

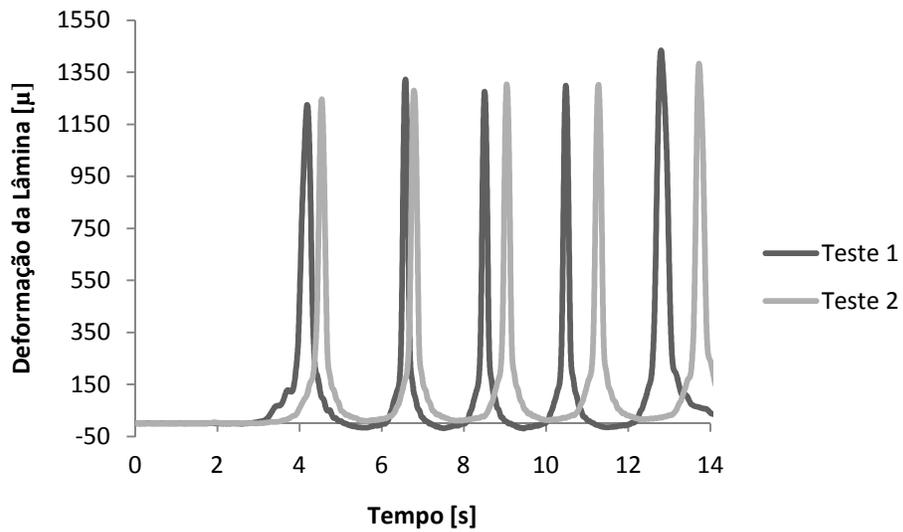


Figura 86: Duas repetições do teste de campo, superfície de asfalto, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

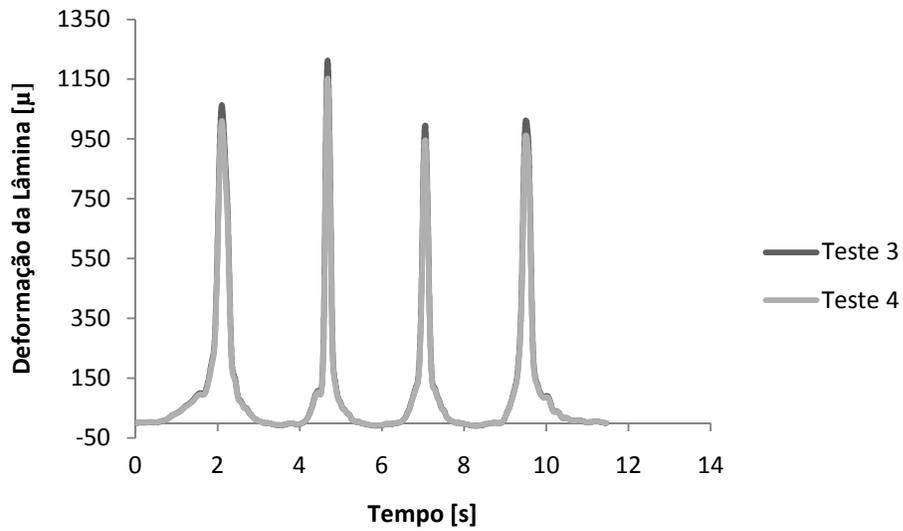


Figura 87: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

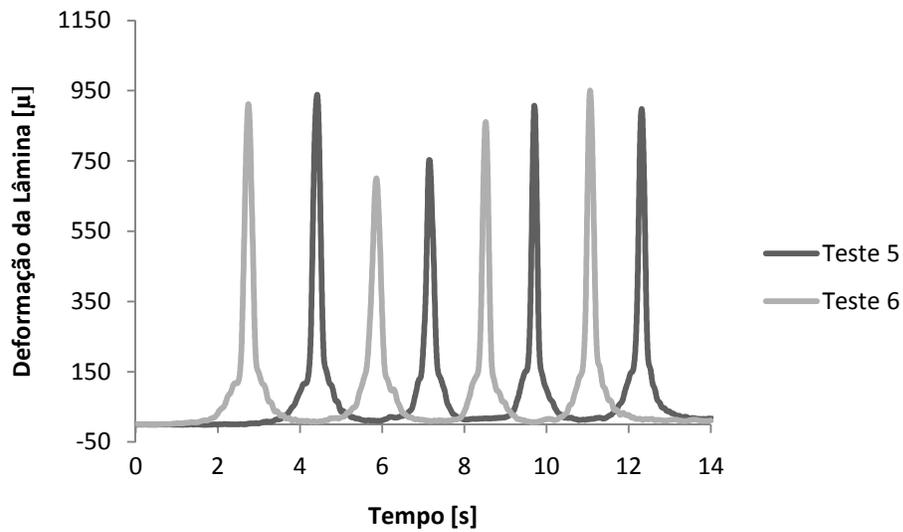


Figura 88: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 9: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
<i>Teste</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx. Giro 2	1321,26	1278,44	1211,79	944,58	700,68	751,64
Deformação Máx. Giro 3	1274,10	1302,52	1151,20	994,29	860,83	895,22
Média Simples	1297,68	1290,48	1181,50	969,44	780,76	823,43
Média Final	1294,08		1075,47		802,09	
Deformação de Tara	1125,00		815,00		815,00	
Força Transversal [N]	2250,00		3440,00		0,00	
Ângulo de esterçamento [°]	1,00		1,00		1,00	
Ângulo 5° roda [°]	0,07		0,08		0,09	
Ângulo de Declive [°]	9,46		15,39		0,00	

Analogamente aos resultados anteriores, os testes foram repetidos alterando-se apenas os ângulos de esterçamento de 1° para 3°.

5.2.2 Para ângulo de esterçamento de 3°.

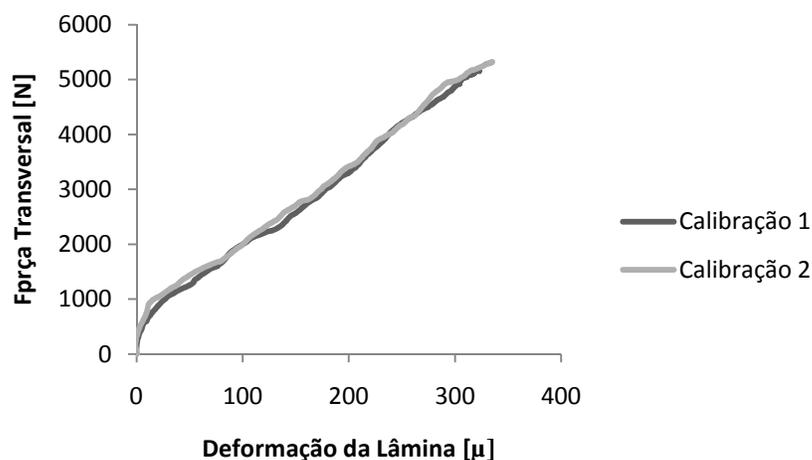


Figura 89: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

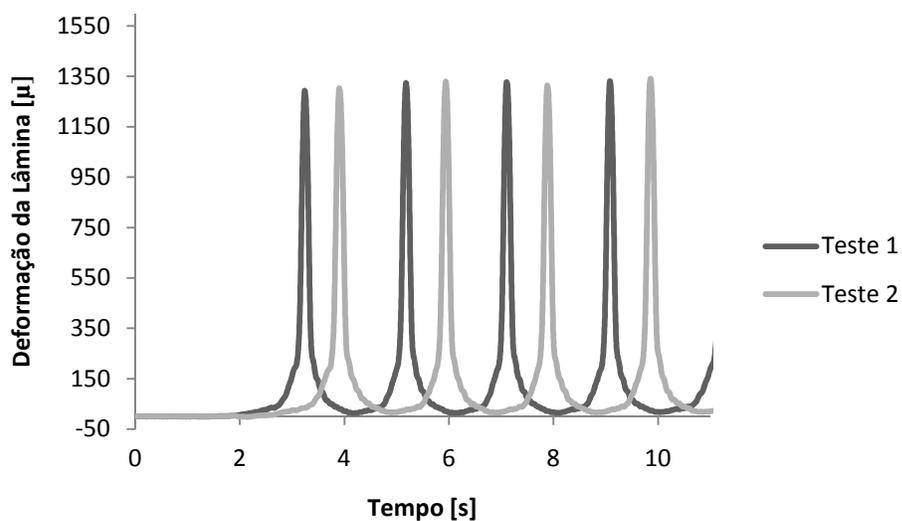


Figura 90: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

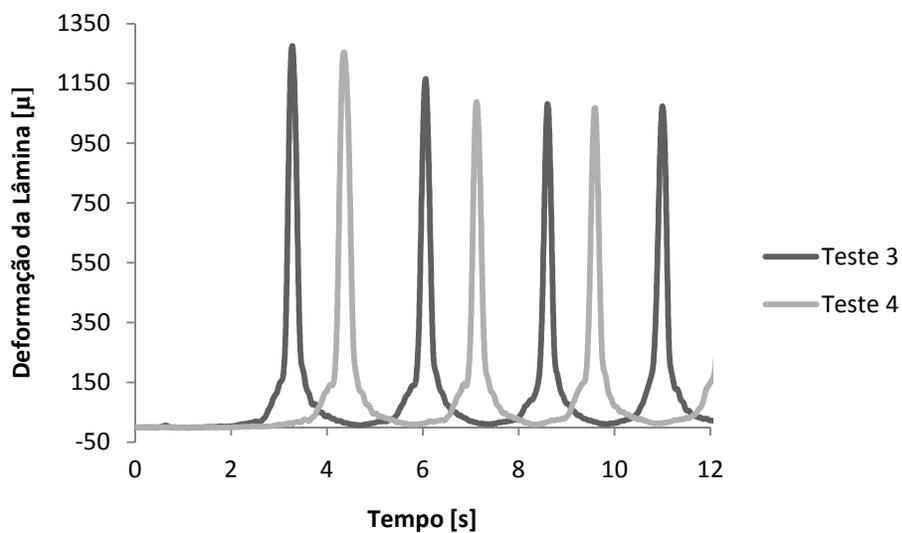


Figura 91: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

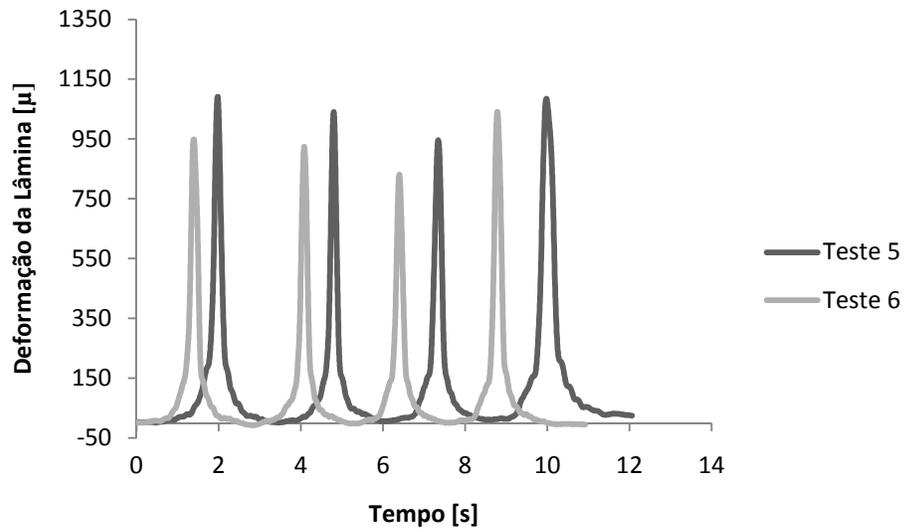


Figura 92: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 10: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 3°, pressão interna de 2,25bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Teste</i>						
Deformação Máx. Giro 2	1323,95	1329,44	1149,17	1088,37	1039,76	945,08
Deformação Máx. Giro 3	1325,95	1294,25	1080,31	1067,29	924,48	817,50
Média Simples	1324,95	1311,85	1114,74	1077,83	982,12	881,29
Média Final	1318,40		1096,29		931,71	
Deformação de Tara	1125,00		815,00		815,00	
Força Transversal [N]	2868,00		4175,00		1738,00	
Ângulo de esterçamento [°]	1,00		1,00		1,00	
Ângulo 5° roda [°]	0,01		0,00		0,05	
Ângulo de Declive [°]	11,99		18,47		7,92	

5.2.3 Para ângulo de esterçamento de 5°.

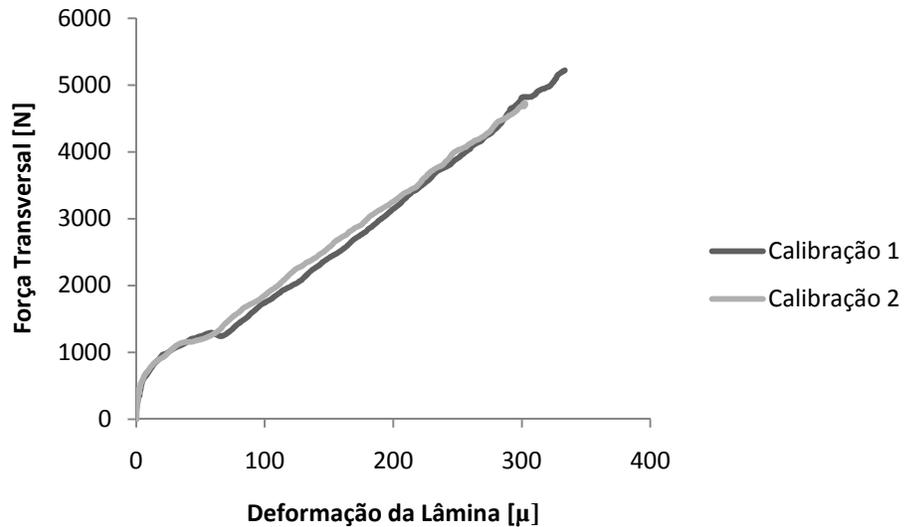


Figura 93: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

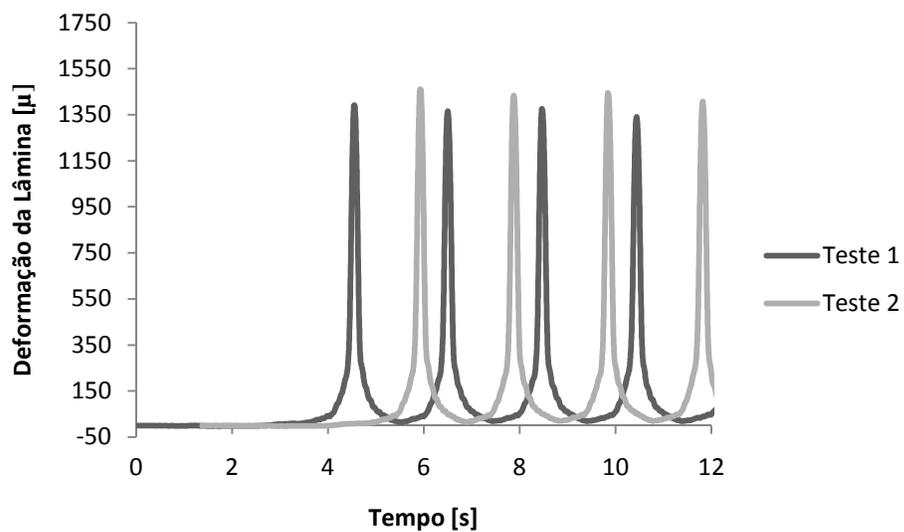


Figura 94: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

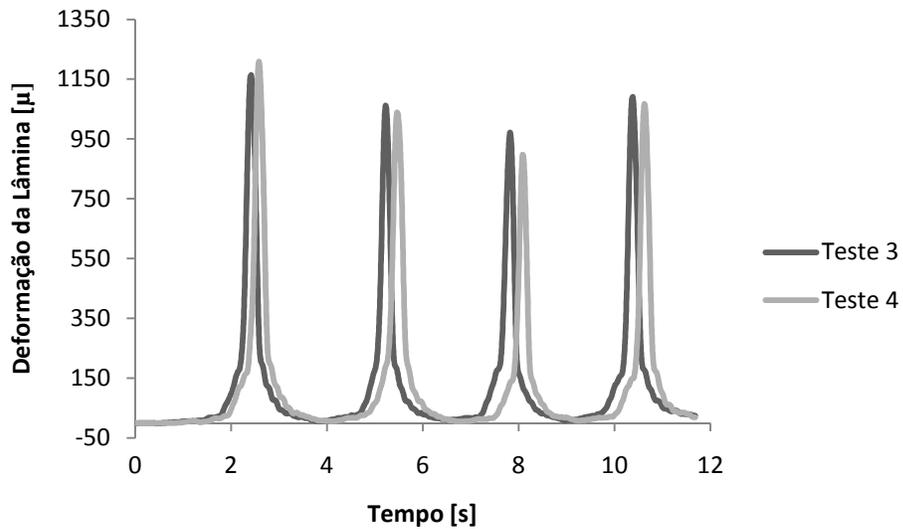


Figura 95: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

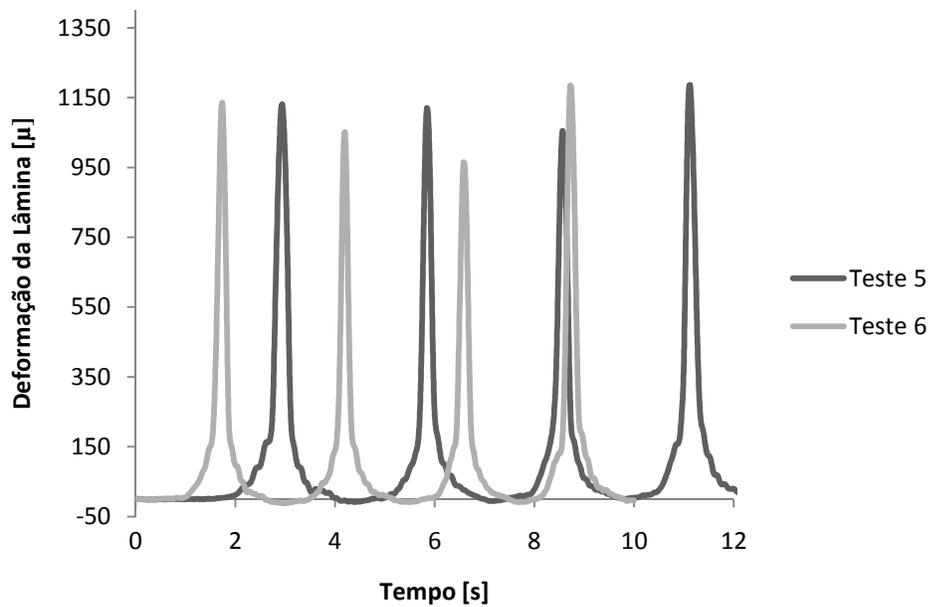


Figura 96: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 11: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 5°, pressão interna de 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx. Giro 2	1364,94	1413,18	1049,99	1031,73	1119,89	1184,00
Deformação Máx. Giro 3	1374,13	1357,64	949,50	896,82	1125,00	964,73
Média Simples	1369,54	1385,41	999,75	964,28	1122,45	1074,37
Média Final	1377,47		982,01		1098,41	
Deformação de Tara	1125,00		815,00		815,00	
Força Transversal [N]	3563,00		2361,00		4001,00	
Ângulo de esterçamento [°]	1,00		1,00		1,00	
Ângulo 5° roda [°]	0,03		0,07		0,02	
Ângulo de Declive [°]	14,79		10,70		17,75	

5.2.4 Análise dos resultados gerais com força vertical de 12,5 kN e pressão de inflação de 2,25 bars.

A figura 97 ilustra o comportamento da força transversal em relação ao ângulo de deriva para a superfície de asfalto não se alterou com o aumento da pressão de inflação do pneu, ou seja, o aumento do ângulo de esterçamento ou deriva, que neste caso tem o mesmo valor continua causando aumento na força transversal.

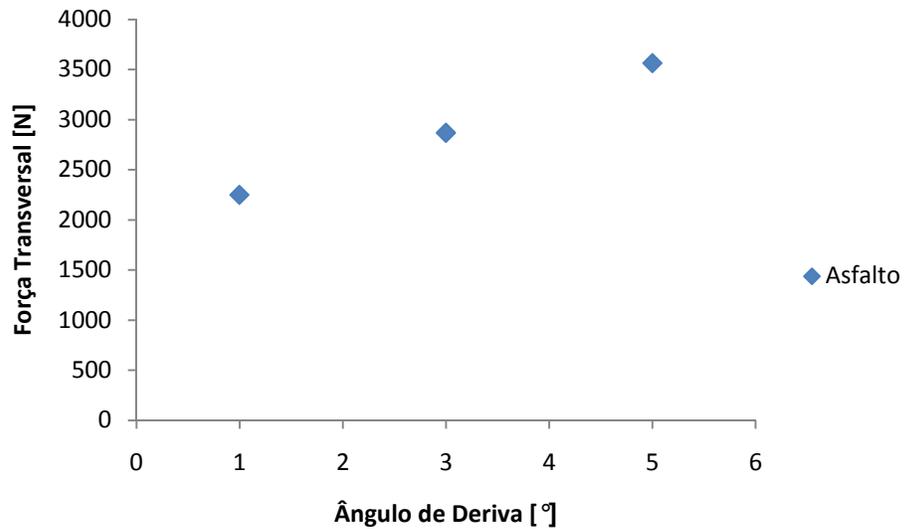


Figura 97: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso de asfalto com pressão de inflação de 2,25 bars. Fonte: Dados da pesquisa.

Porém estes valores de força transversal quando comparados com os mesmos valores obtidos quando o pneu tinha pressão de inflação de 1,85 bar sofrem de queda, causando uma perda no desempenho deste pneumático na superfície asfalto para ângulos de deriva até cinco graus.

A figura 98 mostra a perda de força transversal em superfície de asfalto com o aumento da pressão de inflação do pneu, perda esta que tem valor crescente até treze graus de ângulo de deriva, mas para cinco graus de ângulo de deriva a diferença se torna menos representativa, indicando uma possível inversão nesta característica do comportamento do pneumático.

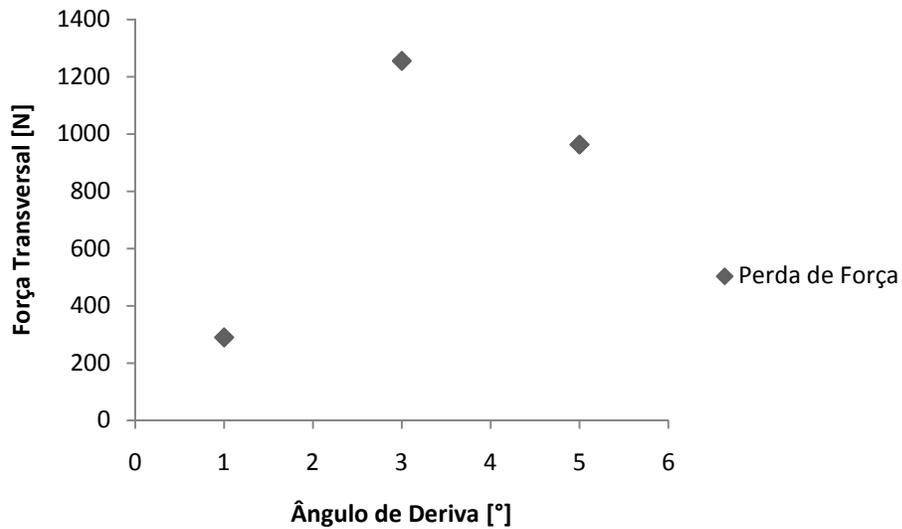


Figura 98: Perda da força transversal por ângulo de deriva com pressão de inflação do pneumático variando de 1,85 bar para 2,25 bars, em piso de asfalto. Fonte: Dados da pesquisa.

A força transversal apresenta uma queda para o ângulo de deriva de aproximadamente 290 N, com o aumento do ângulo de deriva, a diferença se torna ainda maior, chegando ao valor de 1255 N. Ao se aumentar ainda mais o ângulo de deriva, a diferença de força transversal desenvolvida torna-se menor, atingindo agora um valor de 963 N.

Já para pisos macios sem cobertura, o comportamento do pneumático difere do comportamento quando o teste ocorre no piso com asfalto. Como ilustrado na figura 99, a força transversal desenvolvida pelo pneu é crescente com o aumento do ângulo de deriva até três graus, porém com queda desta força quando o ângulo atinge cinco graus, sugerindo um escorregamento do pneu em relação a superfície de apoio.

Para a utilização de uma pressão de inflação menor, um aumento mais linear e crescente da força transversal ocorre, porém nesta condição não se consegue atingir a força máxima transversal desenvolvida pelo pneu para a maior pressão.

Estas duas últimas análises podem ter explicação no fato de, ao se aumentar a rigidez do pneu com o aumento da pressão, este tenha a possibilidade de se apoiar mais sobre o solo macio, gerando uma maior força até que o solo de apoio sofra ação de deformação ou ação maior que a sua resistência mecânica permite. Ao se diminuir a pressão de inflação, a área de contato aumenta propiciando um aumento mais suave de força transversal.

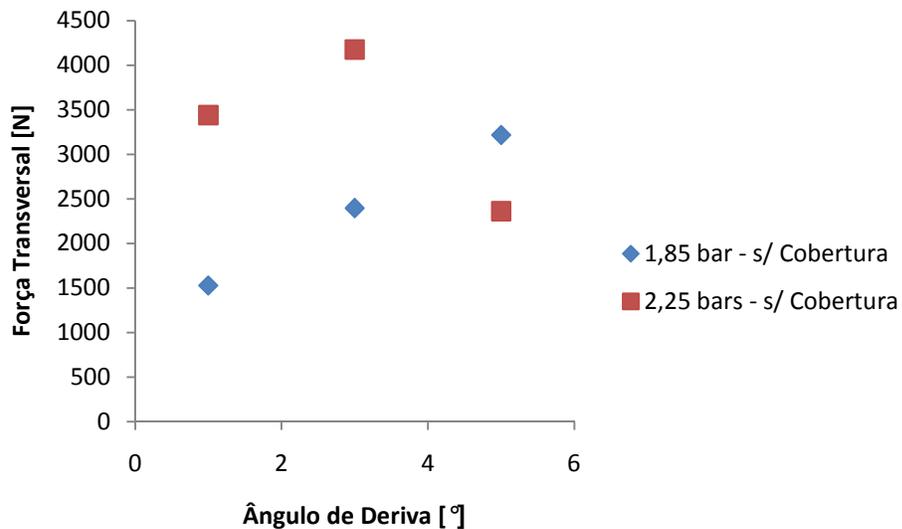


Figura 99: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso com solo compactado sem cobertura com pressão de inflação de 1,85 bar e 2,25 bars.

Fonte: Dados da pesquisa.

A seguir, a figura 100 mostra a comparação entre a força transversal desenvolvida pelo pneu, quando este trafegar sobre piso com solo compactado com cobertura.

Para ambas as pressões, o ângulo de deriva de um grau não causa variação na força, ou seja, em ambos os casos não ocorre força transversal, mas com o aumento deste ângulo a força transversal tem valores significativos, tendo este aumento características diferenciadas com a variação de pressão, sendo mais linear com a pressão superior em relação à pressão inferior, comportamento este, inverso ao encontrado com o piso sem cobertura.

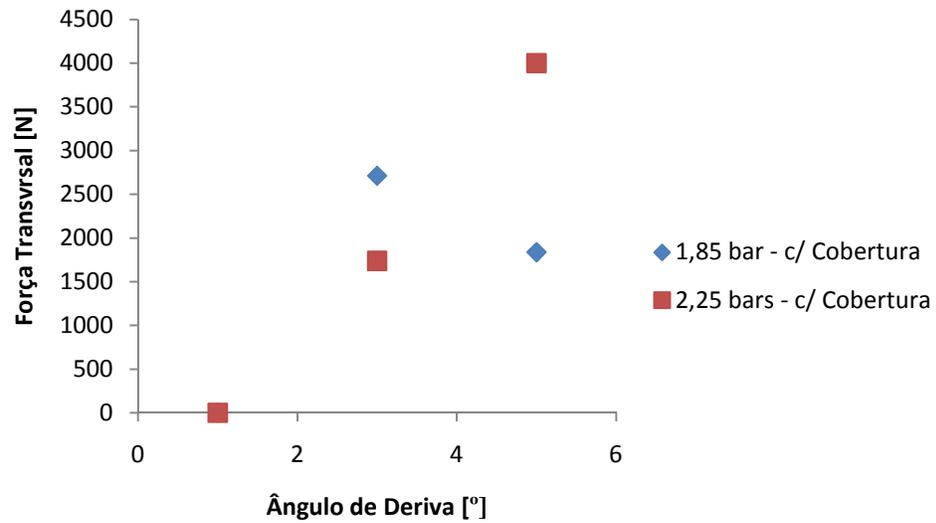


Figura 100: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso com solo compactado com cobertura com pressão de inflação de 1,85 bar e 2,25 bars. Fonte: Dados da pesquisa.

Nota-se então que o desempenho do pneu tem grande a influência com a variação do tipo de piso de tráfego e com o aumento da pressão de inflação.

5.3 Calibração estática e teste de campo com força vertical de 14,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.

5.3.1 Para ângulo de esterçamento de 1°.

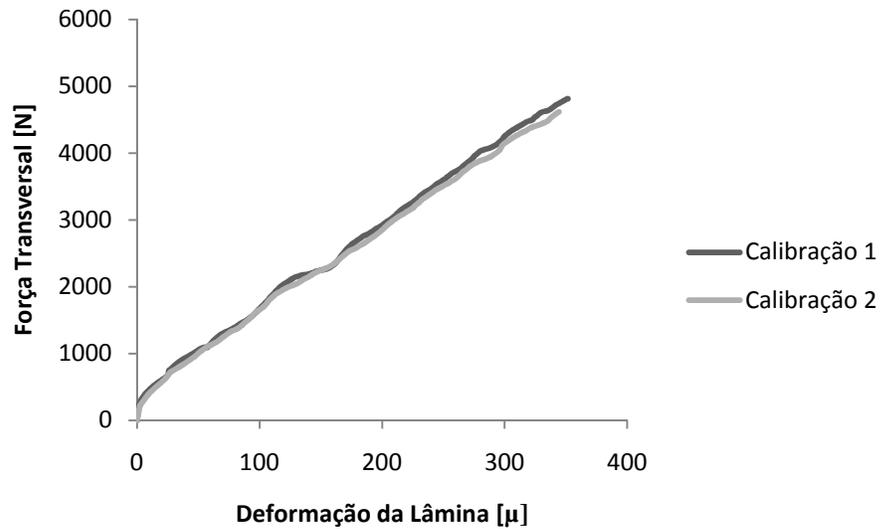


Figura 101: Duas repetições da calibração da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

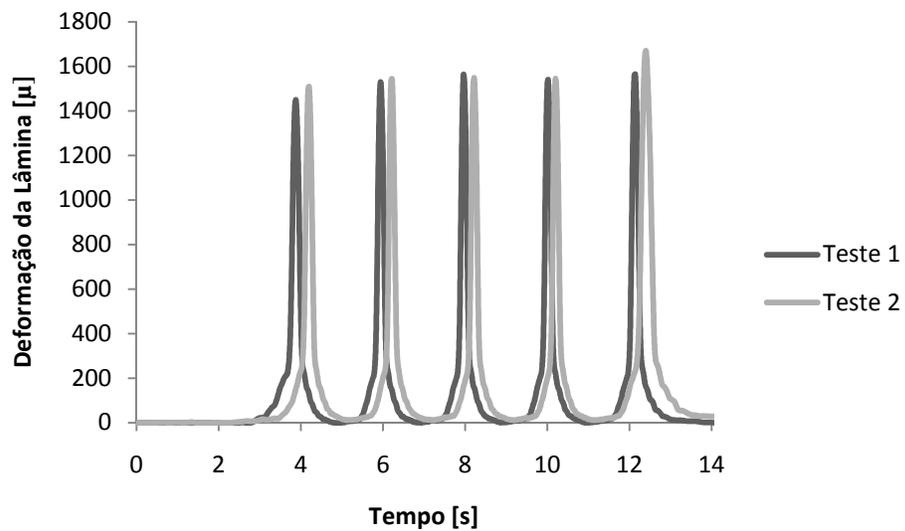


Figura 102: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

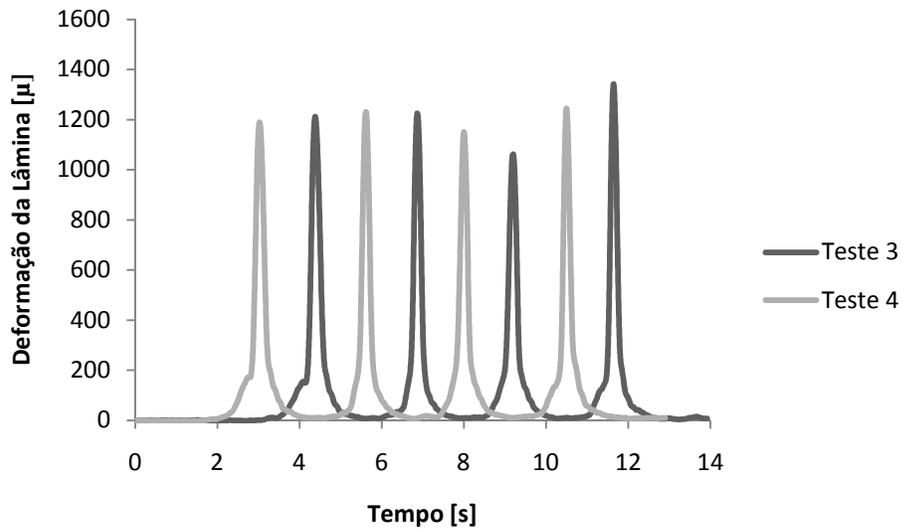


Figura 103: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

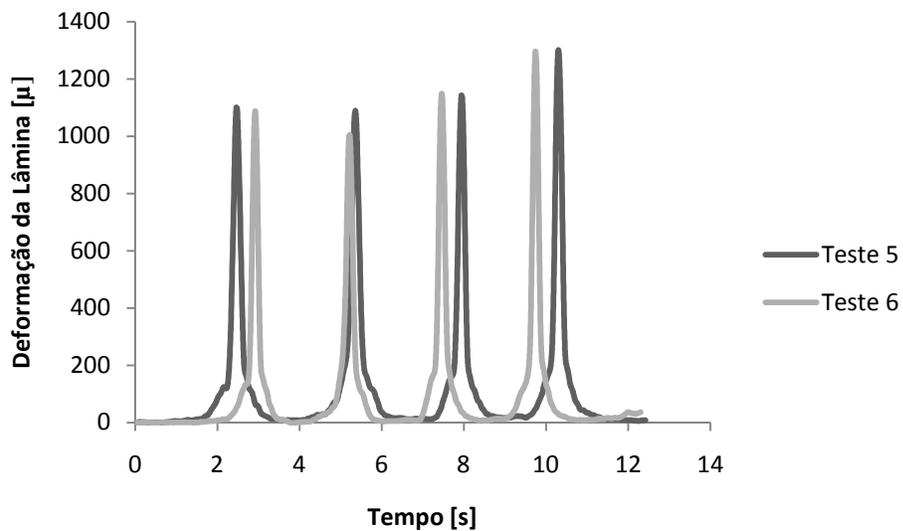


Figura 104: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 12: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 1°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
<i>Teste</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx. Giro 2	1542,94	1547,54	1230,686	1224,415	1088,942	1003,594
Deformação Máx. Giro 3	1543,19	1537,04	1150,755	1061,63	1142,444	1148,383
Média Simples	1543,06	1542,29	1190,72	1143,02	1115,69	1075,99
Média Final	1542,68		1166,87		1095,84	
Deformação de Tara	1388,00		1067,00		1067,00	
Força Transversal [N]	2013,00		1307,00		380,00	
Ângulo de esterçamento [°]	1,00		1,00		1,00	
Ângulo quinta roda [°]	0,16		0,00		0,05	
Ângulo de Declive [°]	7,90		5,15		1,50	

5.3.2 Para ângulo de esterçamento de 3°.

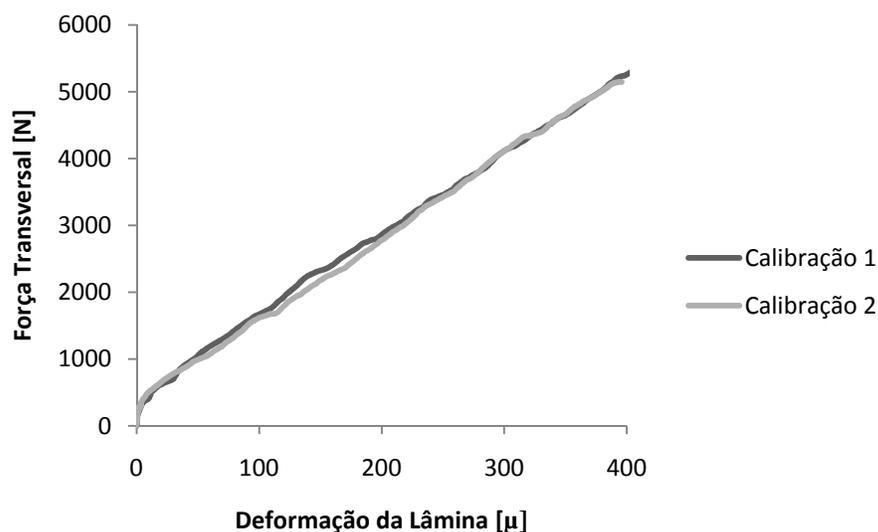


Figura 105: Duas repetições de calibração estática, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

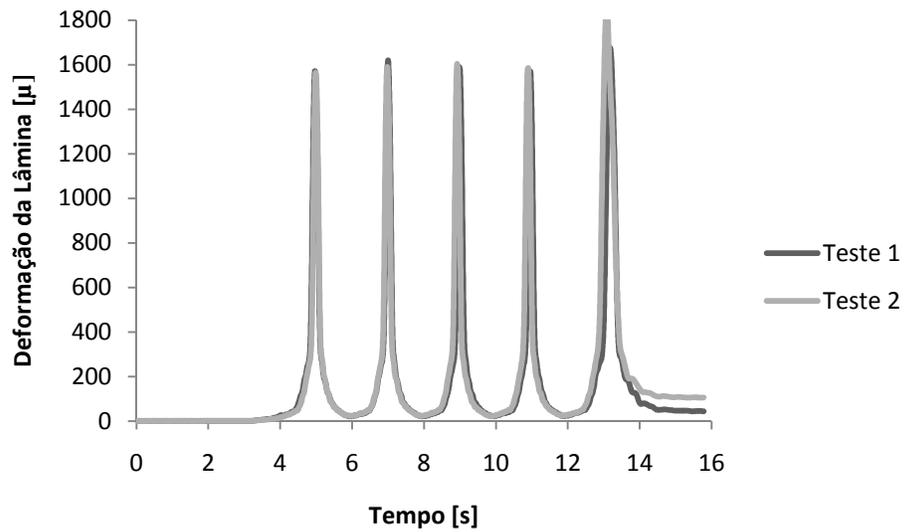


Figura 106: Duas repetições do teste de campo, superfície com asfalto, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

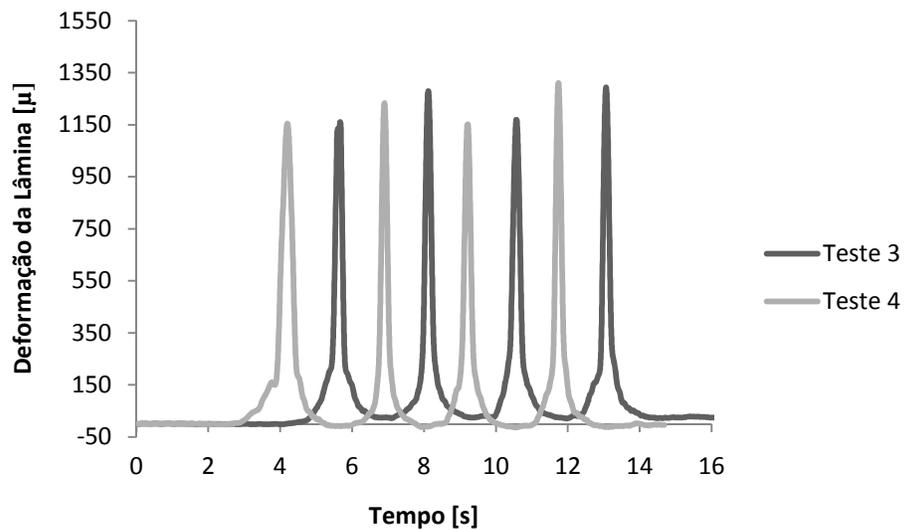


Figura 107: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

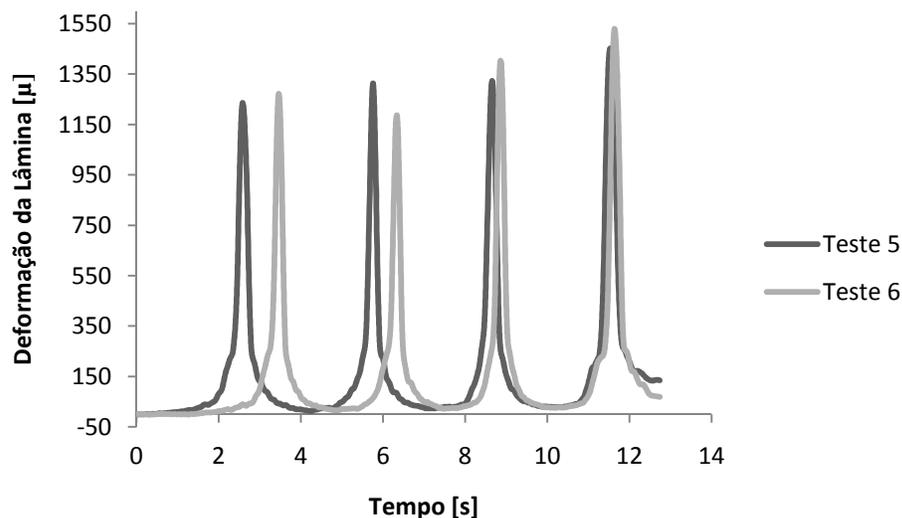


Figura 108: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 13: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 3°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
<i>Teste</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx. Giro 2	1587,68	1615,23	1233,17	1278,54	1186,24	1301,83
Deformação Máx. Giro 3	1618,64	1588,38	1151,47	1168,31	1402,65	1300,29
Média Simples	1603,16	1601,81	1192,33	1223,43	1294,45	1301,06
Média Final	1602,48		1207,88		1297,76	
Deformação de Tara	1388,00		1067,00		1067,00	
Força Transversal [N]	2645,00		1743,00		2843,00	
Ângulo de esterçamento [°]	3,00		3,00		3,00	
Ângulo quinta roda [°]	0,06		0,14		0,02	
Ângulo de Declive [°]	11,95		6,85		11,09	

5.3.3 Para ângulo de esterçamento de 5°.

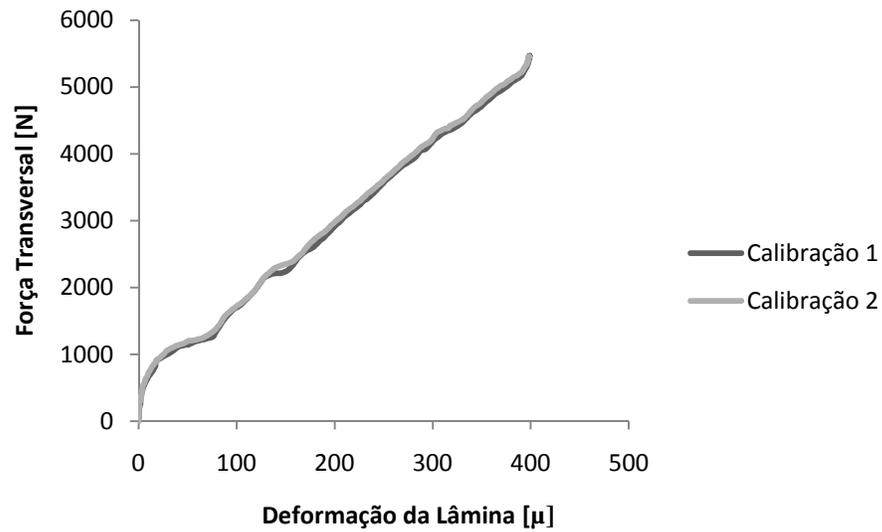


Figura 109: Duas repetições da calibração estática da roda dinamométrica, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

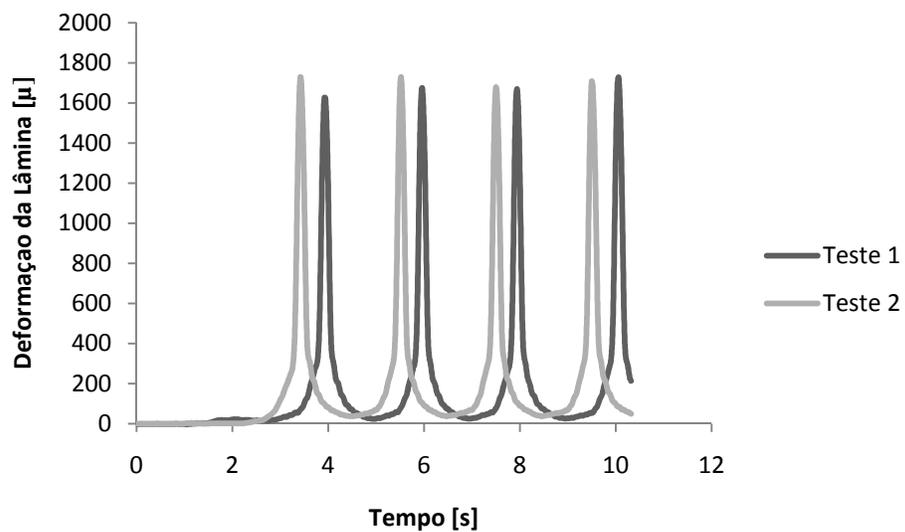


Figura 110: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

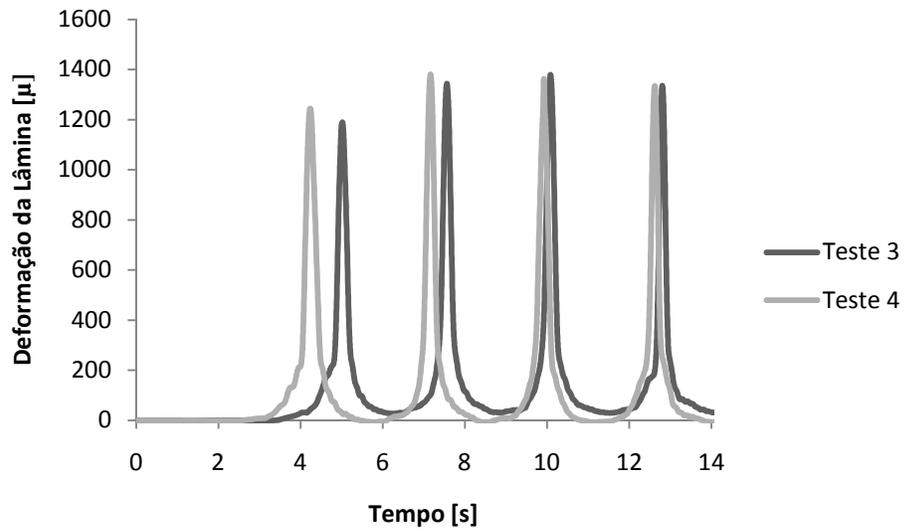


Figura 111: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada sem cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

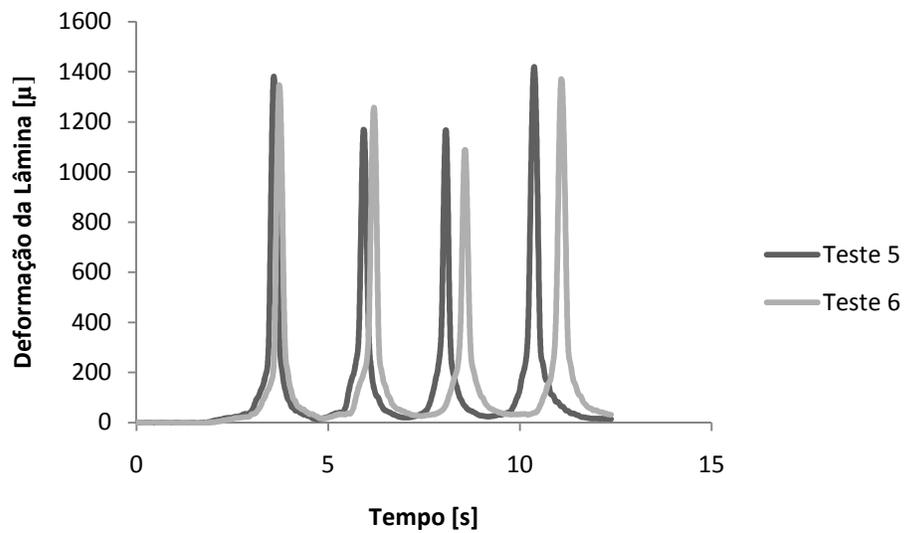


Figura 112: Duas repetições do teste de campo, superfície com terra compactada com cobertura, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 14: Resultado final do ângulo de declive para cada teste de campo, ângulo de esterçamento 5°, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Pavimento</i>	<i>Asfalto</i>		<i>Sem Cobertura</i>		<i>Com Cobertura</i>	
<i>Teste</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Deformação Máx. Giro 2	1674,06	1670,07	1315,56	1380,05	1168,14	1076,15
Deformação Máx. Giro 3	1669,26	1691,79	1348,19	1262,68	1165,96	1087,61
Média Simples	1671,66	1680,88	1331,87	1321,38	1167,01	1081,84
Média Final	1676,27		1326,62		1124,43	
Deformação de Tara	1388,00		1067,00		1067,00	
Força Transversal [N]	3575,00		3226,00		720,00	
Ângulo de esterçamento [°]	5,00		5,00		5,00	
Ângulo quinta roda [°]	0,06		0,02		0,15	
Ângulo de Declive [°]	13,85		12,54		2,84	

5.3.4 Análise dos resultados gerais com força vertical de 14,5 kN e pressão de inflação de 1,85 bar.

A figura 113 compara o desempenho do pneu sendo utilizado no piso de asfalto com a variação da pressão de inflação e da carga vertical. O aumento da pressão do pneu auxilia no aumento da força transversal desenvolvida com a mesma eficiência do que o aumento da carga vertical, mas a condição onde o teste foi executado com a menor pressão e com a menor carga vertical, o pneu obteve o maior desempenho, além de ter tido um comportamento mais linear da força.

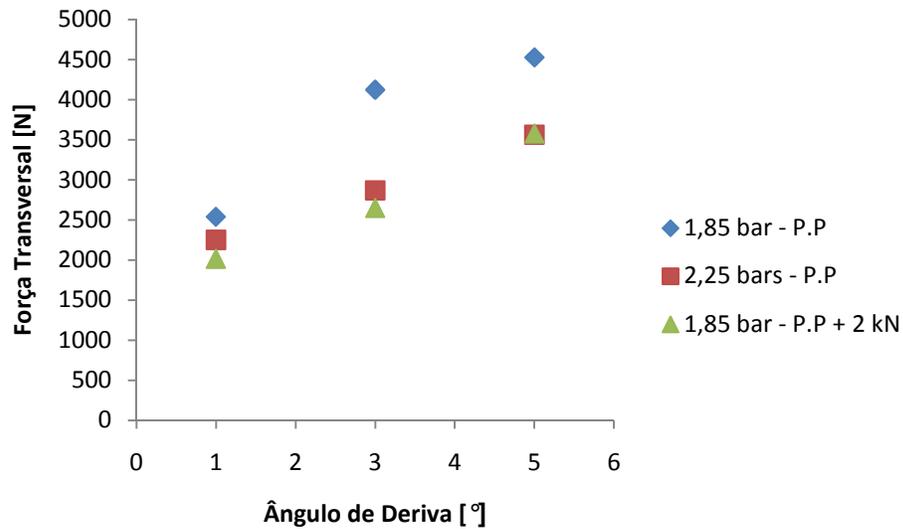


Figura 113: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o asfalto com pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN; com pressão de inflação 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN, por último, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa. P.P-Peso próprio = 12,5 kN e P.P + 2 KN – Peso próprio mais 2 kN = 14,5 kN.

Para o piso sem cobertura, ilustrado na figura 114, existe uma indicação na melhora do desenvolvimento da força transversal com o aumento da carga vertical para ângulos de deriva acima de três graus.

O aumento da pressão para este piso é viável para ângulos de deriva menores, neste caso inferior a três graus, uma vez que o aumento deste ângulo acarreta em uma queda da força transversal.

No caso de se optar por um comportamento mais linear, a melhor condição se encontra utilizando a menor pressão de inflação e a menor força vertical, porém a força máxima desenvolvida com a característica citada tem valor igual à encontrada a carga vertical é maior.

Desta maneira pode-se afirmar que o aumento da carga vertical para a condição de solo compactado sem cobertura aumenta o desempenho do pneu, diferentemente do ocorrido no piso de asfalto.

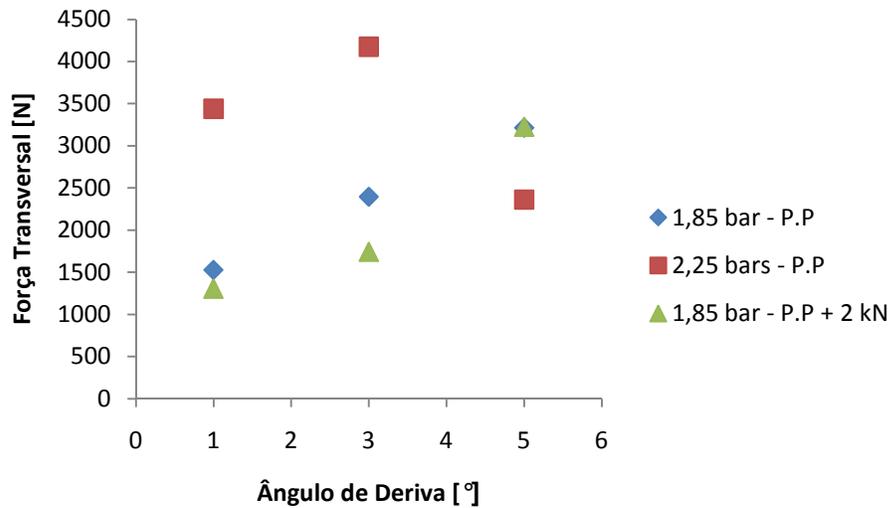


Figura 114: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso sem cobertura com pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN com pressão de inflação 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN, por último, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5kN. Fonte: Dados da pesquisa. P.P-Peso próprio = 12,5 kN e P.P + 2 KN – Peso próprio mais 2 kN = 14,5 kN.

A figura 115 ilustra a resposta do teste com as mesmas condições que o teste anterior, apenas alterando o piso com solo compactado sem cobertura para um piso compactado com cobertura.

A melhor opção para se obter um desempenho mais linear do pneu em se tratando de força transversal neste piso é utilizar a maior pressão de inflação para ângulo de deriva de até cinco graus. Para ângulos de deriva menores, a melhor opção de desempenho é a utilização de pressões de inflação menores, com ou sem o aumento da carga vertical, pois o comportamento em ambas as condições tem praticamente a mesma resposta para os ângulos de deriva até três graus, ocorrendo uma pequena alteração deste comportamento no ângulo de deriva de cinco graus.

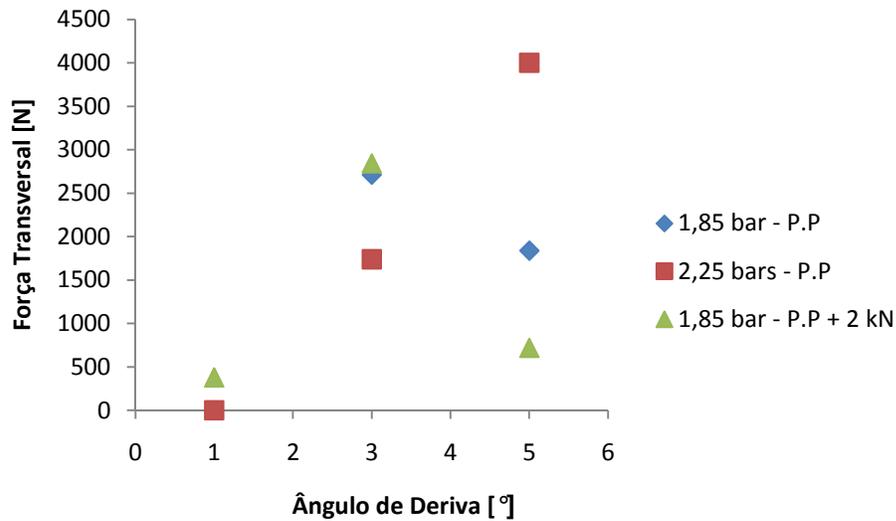


Figura 115: Força transversal desenvolvida pelo pneu em relação ao ângulo de deriva para o piso com cobertura com pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 12,5 kN; com pressão de inflação 2,25 bars e força vertical de 12,5 kN, por último, pressão de inflação de 1,85 bar e força vertical de 14,5 kN. Fonte: Dados da pesquisa. P.P-Peso próprio = 12,5 kN e P.P + 2 KN – Peso próprio mais 2 kN = 14,5 kN.

A seguir será feita um comparativo no desempenho do pneu quando ocorrer uma solicitação de força longitudinal simultaneamente com uma força transversal.

5.4 Avaliação do comportamento da força transversal com a variação da força longitudinal.

Com o auxílio do sistema de calibração da roda dinamométrica, uma análise do comportamento do pneu foi feita, aplicando-se a placa anti-atrito duas forças horizontais, sem uma delas transversal e a outra longitudinal ao plano do contato do pneu no solo.

A figura 116 ilustra a fixação do atuador, localizado à frente da roda dinamométrica possibilitando a aplicação de forças longitudinais, e com o atuador instalado transversalmente a linha longitudinal do veículo, aplica-se simultaneamente a força lateral, como descrito no capítulo 4.



Figura 116: Posição do atuador hidráulico, localizado à frente da roda dinamométrica com o objetivo de simular força longitudinal na roda dinamométrica. Fonte: Dados da pesquisa.

Obteve-se na curva de calibração da roda dinamométrica, ilustrada na figura 117, a deformação da lâmina interna do sensor com a aplicação da força longitudinal e da força transversal em função do tempo.

Sem a aplicação de nenhuma força no tempo em zero segundos, carrega-se a roda dinamométrica com o peso do trator, fazendo com que a lâmina tenha deformação na ordem de $1150 \mu\text{m/m}$, ponto um, permanecendo constante até que a força longitudinal seja aplicada.

Observa-se que ao se aplicar a força longitudinal, aproximadamente aos 80s, ocorre um decréscimo na deformação da lâmina, como mostra o ponto dois, indicando que o pneumático se acomodou, causando uma nova condição de deformação.

Na linha do tempo em 160s, aplica-se uma força transversal mantendo-se a força longitudinal constante, ponto três, causando um aumento na deformação da lâmina interna, porém ocorre uma queda na força longitudinal que deveria se manter constante, mostrando que o pneu novamente se acomodou de forma a permitir um movimento relaxando a força aplicada pelo atuador longitudinal.

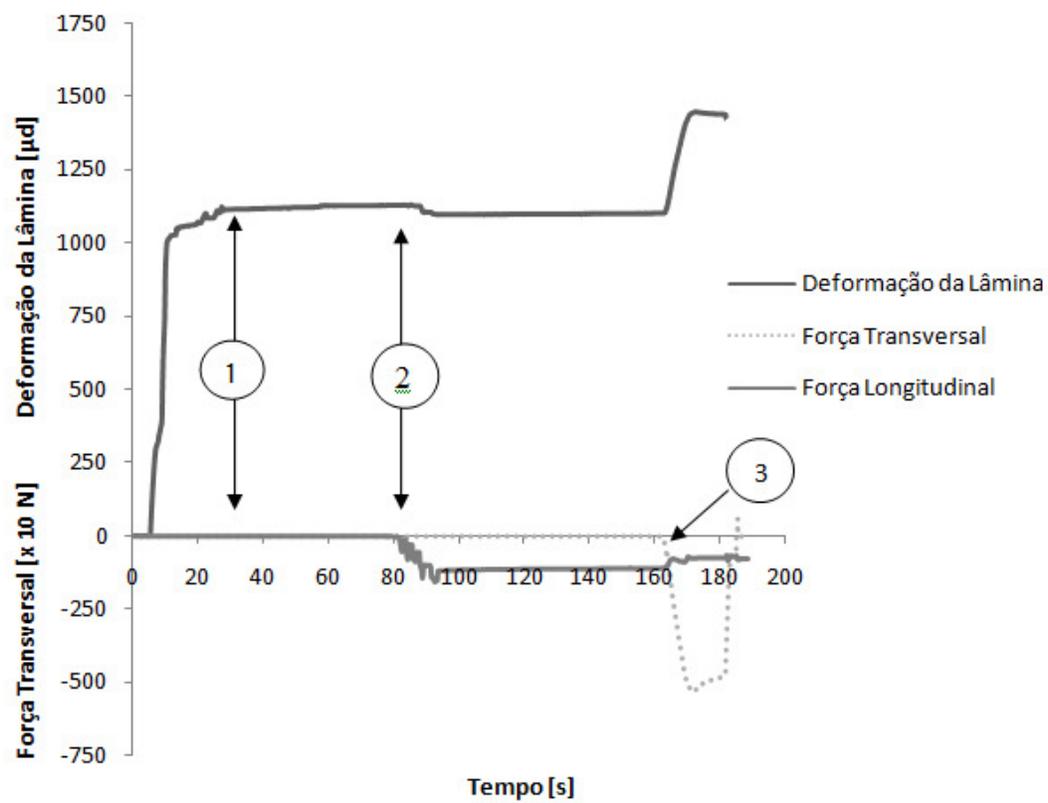


Figura 117: Curva de calibração da roda dinamométrica com a aplicação simultânea da força longitudinal e da força transversal. Fonte: Dados da pesquisa.

Para que se tenha uma melhor visualização da ocorrência no ponto três, a figura 118 ilustra as forças transversais e longitudinais coletadas próximas a este ponto, que revela uma queda na força longitudinal com o aumento da força transversal, mostrando que o pneumático tem um comportamento diferenciado quando é sujeito apenas a uma força transversal ou quando é sujeito a uma força transversal e uma força longitudinal.

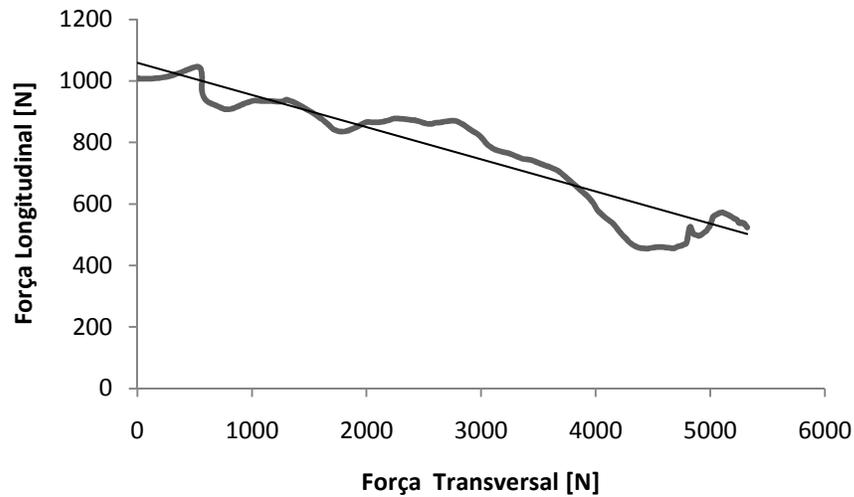


Figura 118: Comparação entre a força transversal e a força longitudinal. Destaque na linha do tempo da figura 117 após 160s. Fonte: Dados da pesquisa.

Para que fosse possível uma avaliação mais precisa do comportamento do pneu quando sujeito a duas forças, uma transversal e a outra longitudinal, uma análise sobre conduta na deformação interna do pneu foi feita. A figura 119 ilustra esta conduta de deformação da lâmina interna da roda com e sem a aplicação da força longitudinal.

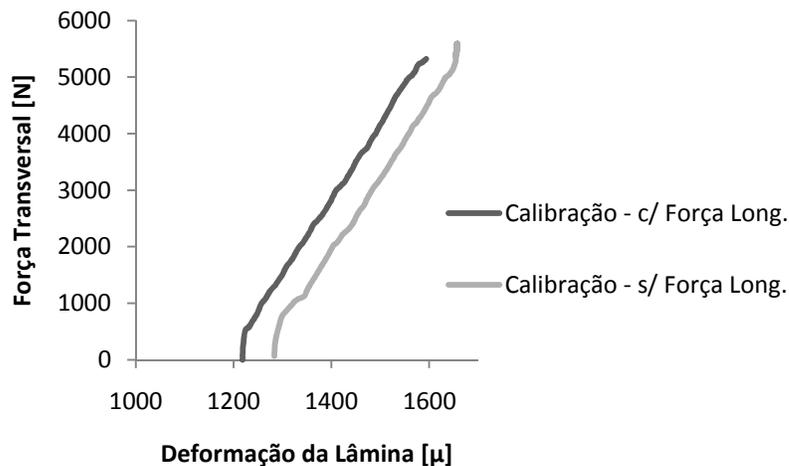


Figura 119: Comparação entre a deformação da lâmina interna da roda dinamométrica com a ação da força longitudinal aplicada e sem a força longitudinal aplicada. Fonte: Dados da pesquisa.

Comparando-se as duas calibrações, nota-se que apresentam deformações diferentes, ou seja, a resultante considerando a força longitudinal aplicada não apresenta o mesmo valor de força transversal em relação à resultante sem considerar a força longitudinal, caracterizando uma diferença na deformação do pneu para as devidas solicitações de forças.

De posse das curvas de calibração, obteve-se a tabela 15, que compara a força transversal necessária para que se tenha a deformação da lâmina interna da roda dinamométrica, com e sem a aplicação da força longitudinal.

Tabela 15: Comparação entre as forças transversais resultantes com e sem aplicação de força longitudinal. Fonte: Dados da pesquisa.

<i>Caso 1 - Com a aplicação da força longitudinal</i>		<i>Caso 2 - Sem aplicação da força longitudinal</i>	
Deformação [μ]	Fy [N]	Deformação [μ]	Fy [N]
1350	186	1350	1230
1400	850	1400	1960
1450	486	1450	3550
1500	160	1500	3350

A tabela 15 mostra que para a mesma deformação da lâmina, quando o método de calibração é o caso um, a força transversal tem valor maior do que aquele encontrado no caso 2, mostrando que o pneumático tem maior rigidez quando é sujeito a uma força longitudinal.

Para estudar a variação de força transversal com e sem força longitudinal, verificou-se o comportamento da roda dinamométrica no teste de campo em duas circunstâncias, na primeira aplicando-se ao trator apenas as forças resistivas convencionais, que neste caso são as forças de resistência ao rolamento e na segunda, somando a esta força de resistência ao rolamento uma força de frenagem dos rodados traseiros do trator.

Pelo fato da máquina utilizada nos testes ser equipada com motores hidráulicos nas quatro rodas, foi possível com o auxílio de duas válvulas estranguladoras de vazão frear duas das quatro rodas deste. A figura 120 ilustra o conceito utilizado.

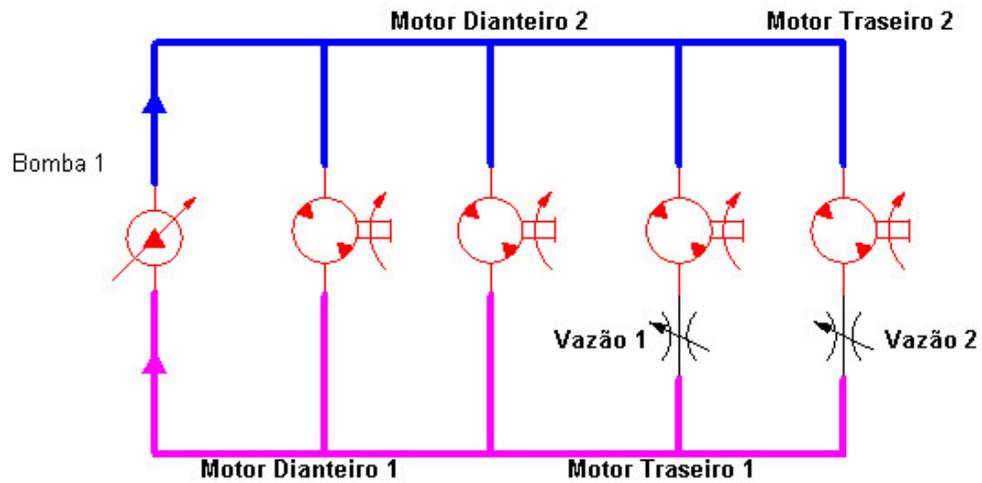


Figura 120: Posição das válvulas estranguladoras de vazão no sistema hidráulico do trator utilizado nos testes de campo. Fonte: Dados da pesquisa.

A figura 121 ilustra as deformações máximas ocorridas na roda dinamométrica para a válvula estranguladora fechada, ou seja, com acréscimo de força resistiva, causando uma força longitudinal na roda dinamométrica.

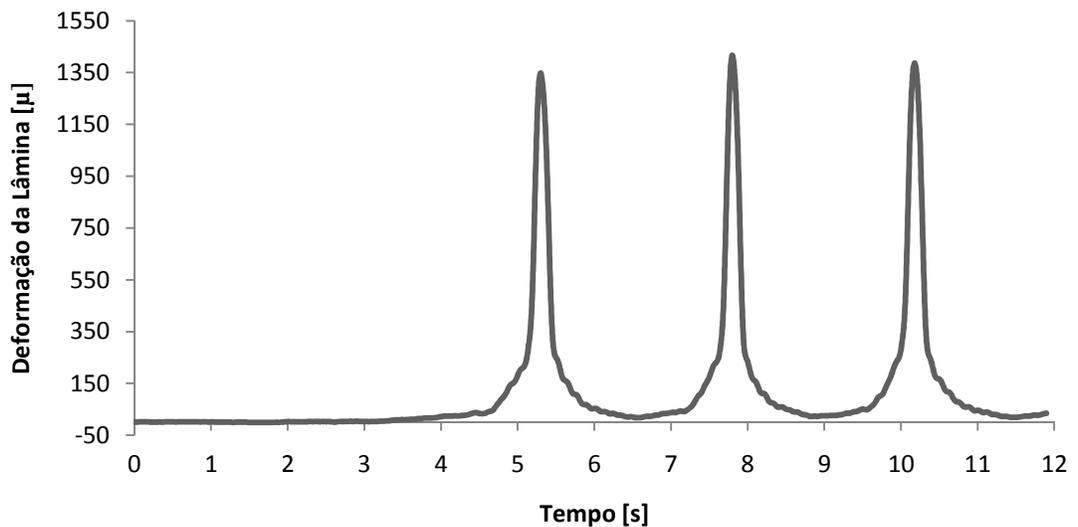


Figura 121: Deformação da lâmina quando a roda dinamométrica é sujeita a uma força longitudinal e transversal simultaneamente, pressão de inflação de 1,85 bar, esterçamento de 3° e peso próprio. Fonte: Dados da pesquisa.

A figura 122 mostra o mesmo teste de campo que o anterior, porém com a válvula estranguladora aberta, ou seja, sem a influência de uma força longitudinal.

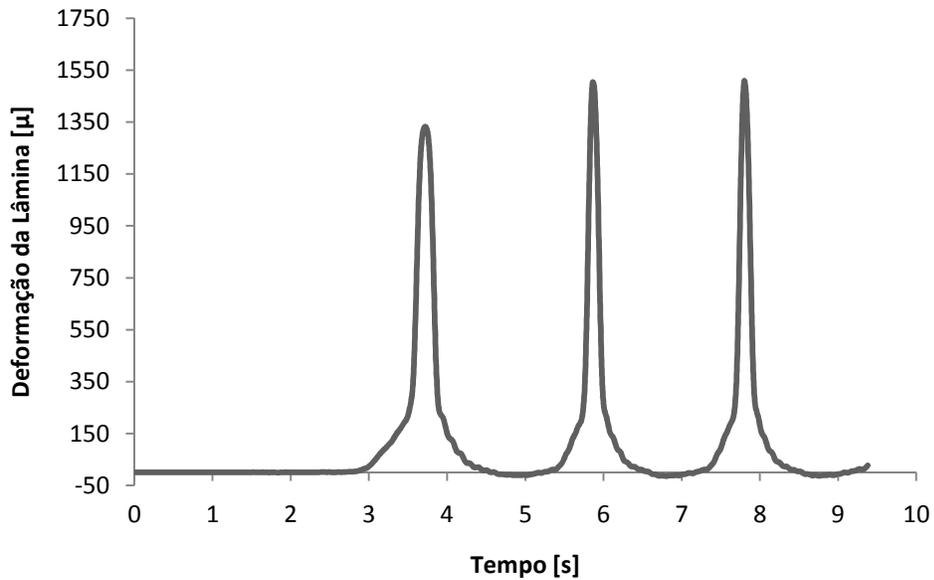


Figura 122: Deformação da lâmina quando a roda dinamométrica é sujeita a uma força transversal, pressão de inflação de 1,85 bar, esterçamento de 3° e peso próprio. Fonte: Dados da pesquisa.

A comparação entre as deformações ocorridas com a aplicação da força longitudinal e sem a aplicação da força longitudinal revelou que no primeiro caso o valor de deformação máxima da lâmina interna foi de 1400 $\mu\text{m/m}$, inferior ao ocorrido no segundo caso, que foi de 1505 $\mu\text{m/m}$, desta maneira pode-se concluir que o pneumático quando sujeito a um torque disponibiliza menos força transversal, ou seja, a aplicação de força longitudinal acarreta o aumento da rigidez de deriva do pneu fazendo com que para uma mesma força transversal gerada pelo pneu ocorra uma menor deriva.

5.5 Modelo matemático experimental.

O objetivo consiste em definir um modelo matemático experimental que com o auxílio dos principais parâmetros de utilizados nos testes de campo e nas diversas calibrações possa indicar a força transversal que o pneu disponibilizará, para os três tipos de piso. Com os resultados anteriores pode-se propor que os principais parâmetros de influência na conduta do pneu são:

- Ângulo de esterçamento [δ].
- Pressão interna do pneu [p].
- Força vertical [F_z].
- Tipo de pavimento [P_v].

Desta maneira, os valores foram organizados como ilustra a tabela 16, com os dados coletados para o piso de asfalto. A mesma tabela foi construída para as condições de piso macio sem e com cobertura na superfície, como ilustra a tabela 17 e a tabela 18.

A pressão de inflação de 2,05 bars referenciada aqui não foi utilizada em nenhuma das discussões anteriores por se tratar de uma pressão intermediária de verificação das tendências entre a pressão de 1,85 e 2,25 bars, porém para a modelagem experimental o valor se torna fundamental para o ajuste da curva apresentada a seguir.

Os valores dos ângulos de esterçamento de 9° e 13° anteriormente utilizados foram descartados desta análise por terem apenas testes na primeira condição de análise, não sendo comuns para todo experimento.

Tabela 16: Dados coletados dos testes de campo, piso asfalto. Fonte: Dados da pesquisa.

Pressão [bar]	δ [°]	Fz [kN]	Fy [N]Asfalto
1,85	1	12,5	2539,88
1,85	3	12,5	4123,47
1,85	5	12,5	4526,40
2,05	1	12,5	2684,96
2,05	3	12,5	3767,40
2,05	5	12,5	4149,60
2,25	1	12,5	2249,10
2,25	3	12,5	2867,98
2,25	5	12,5	3563,28
1,85	1	14,5	2012,78
1,85	3	14,5	2645,04
1,85	5	14,5	3574,08
2,05	1	14,5	3006,70
2,05	3	14,5	2708,39
2,05	5	14,5	4051,64
2,25	1	14,5	4222,80
2,25	3	14,5	3059,16
2,25	5	14,5	3554,65

Tabela 17: Dados coletados dos testes de campo, piso com solo compacto sem cobertura.

Fonte: Dados da pesquisa.

Pressão [bar]	δ [°]	Fz [kN]	Fy [N] Solo s/C
1,85	1	12,5	1526,63
1,85	3	12,5	2395,90
1,85	5	12,5	3214,40
2,05	1	12,5	2684,96
2,05	3	12,5	3767,40
2,05	5	12,5	4149,60
2,25	1	12,5	3439,80
2,25	3	12,5	4175,66
2,25	5	12,5	3563,28
1,85	1	14,5	1307,00
1,85	3	14,5	1742,76
1,85	5	14,5	3226,60
2,05	1	14,5	1952,95
2,05	3	14,5	2204,82
2,05	5	14,5	3296,88
2,25	1	14,5	3891,60
2,25	3	14,5	4258,02
2,25	5	14,5	6153,90

Tabela 18: Dados coletados dos testes de campo, piso com solo compacto com cobertura.

Fonte: Dados da pesquisa.

Pressão [bar]	δ [°]	Fz [kN]	Fy [N]Solo c/C
1,85	1	12,5	0
1,85	3	12,5	2711,15
1,85	5	12,5	1836,80
2,05	1	12,5	622,80
2,05	3	12,5	1835,40
2,05	5	12,5	2143,05
2,25	1	12,5	0
2,25	3	12,5	1738,62
2,25	5	12,5	4001,62
1,85	1	14,5	379,03
1,85	3	14,5	2842,80
1,85	5	14,5	719,78
2,05	1	14,5	885,15
2,05	3	14,5	1742,08
2,05	5	14,5	2270,88
2,25	1	14,5	1780,20
2,25	3	14,5	3500,12
2,25	5	14,5	2571,15

Inicialmente definiu-se o modelo de regressão utilizado para a determinação de uma equação matemática que represente melhor o fenômeno para as três condições de piso.

Três modelos de regressão foram avaliados através da menor variabilidade dos valores em torno da linha de regressão em relação à variabilidade geral, sendo então melhor a previsão elaborada.

A escolha dos modelos forma a regressão simples, a regressão polinomial e a regressão fatorial. A variabilidade de cada um dos modelos é expressa na tabela 19. Para a

regressão simples, foi escolhida a pressão como variável de previsão do modelo, pois entre as variáveis descritas anteriormente foi a que obteve melhor resultado.

Tabela 19: Comparação da variabilidade do modelo para cada escolha de regressão. Fonte: Dados da pesquisa.

Regressão Simples			
Pavimento	R	R ²	R ² ajustado
Asfalto	0,588735	0,346608	0,305771
Macio s/ Cobertura	0,511868	0,262009	0,215885
Macio c/ Cobertura	0,601698	0,362040	0,322168

Regressão Polinomial			
Pavimento	R	R ²	R ² ajustado
Asfalto	0,654438	0,428289	0,190076
Macio s/ Cobertura	0,875834	0,767085	0,670037
Macio c/ Cobertura	0,801833	0,642936	0,494159

Regressão Fatorial			
Pavimento	R	R ²	R ² ajustado
Asfalto	0,868260	0,753876	0,581589
Macio s/ Cobertura	0,923718	0,853256	0,750535
Macio c/ Cobertura	0,797214	0,635550	0,380435

A regressão que apresentou o melhor comportamento foi a fatorial, a figura 123 apresenta a relação entre os valores coletados no ensaio e os valores previstos pelo modelo para a condição de pavimento asfáltico. Analogamente a figura 124 e a figura 125 ilustram a comparação entre os valores observados e os valores previstos.

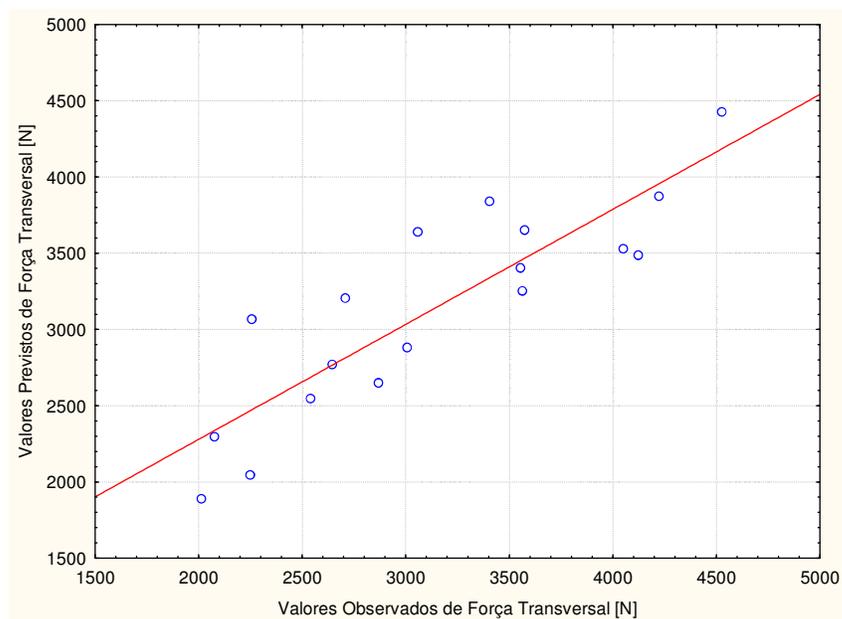


Figura 123: Comparação entre os valores previstos de força transversal no piso de asfalto e os valores observados de força transversal no piso de asfalto. Fonte: Dados da pesquisa.

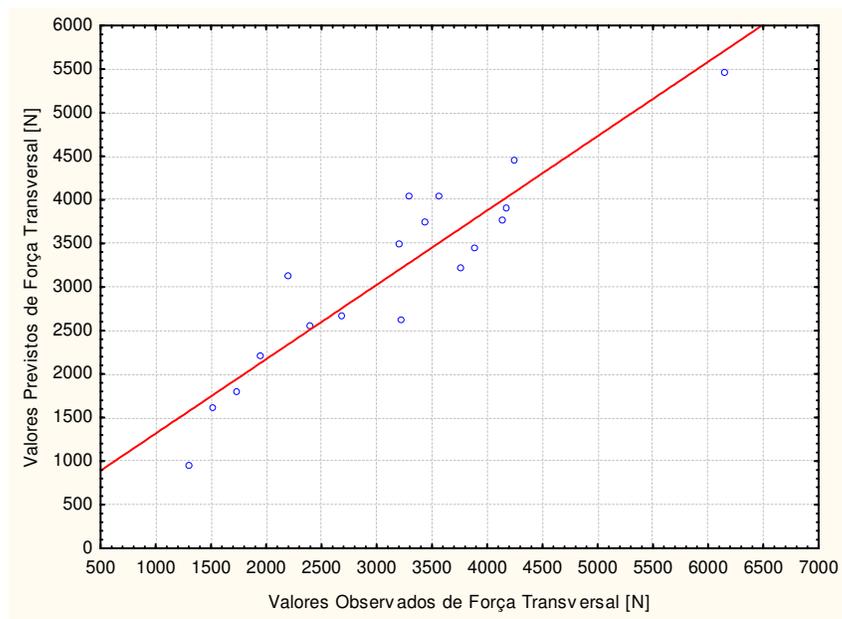


Figura124: Comparação entre os valores previstos de força transversal no piso sem cobertura e os observados de força transversal no piso sem cobertura. Fonte: Dados da pesquisa.

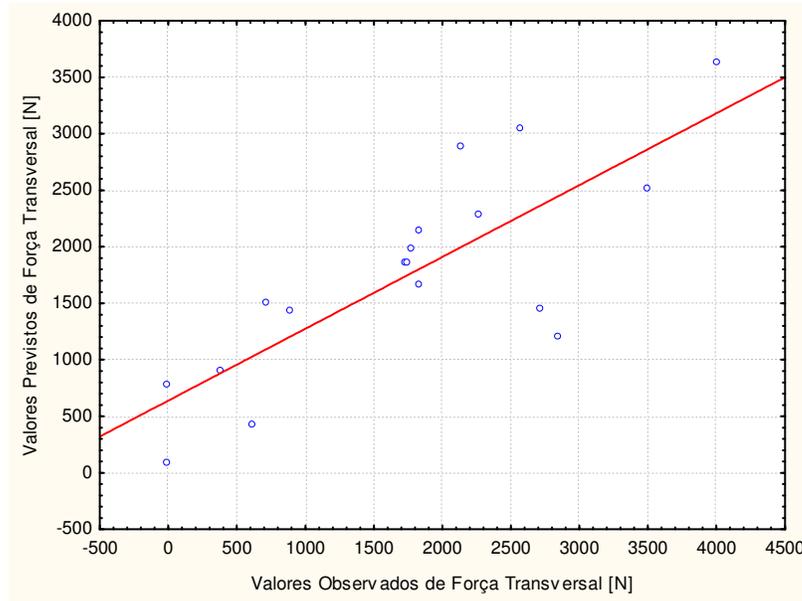


Figura 125: Comparação entre os valores previstos de força transversal e os valores observados de força transversal, piso macio com cobertura. Fonte: Dados da pesquisa.

Desta maneira, as equações de previsão ilustradas nas figuras têm as seguintes formas:

Para piso asfáltico:

$$F_y = 90565,20 - 45713,80 * p - 9820,15 * \delta - 6956,20 * F_z + 5662,25 * p * \delta + 3590,66 * p * F_z + 885,40 * \delta * F_z - 486,60 * p * \delta * F_z$$

Para piso macio sem cobertura:

$$F_y = -9655,15 + 7891,73 * p + 16376,20 * \delta - 69,50 * F_z - 8426,90 * p * \delta - 127,25 * p * F_z - 1127,92 * \delta * F_z + 595,90 * p * \delta * F_z$$

Para piso macio com cobertura:

$$F_y = 67490,50 - 37312,68 * p - 13369,30 * \delta - 4911,29 * F_z + 8050,75 * p * \delta + 2739,78 * p * F_z + 896,75 * \delta * F_z - 535,82 * p * \delta * F_z$$

Onde:

F_y = Força transversal desenvolvida pelo pneu [N].

P = Pressão de inflação do pneu [bar].

F_z = Força vertical aplicada à roda [N].

δ = Ângulo de esterçamento da roda [°].

Pode-se então comparar o nível de influência que cada parâmetro tem sobre a força transversal desenvolvida pelo pneu para cada tipo de piso.

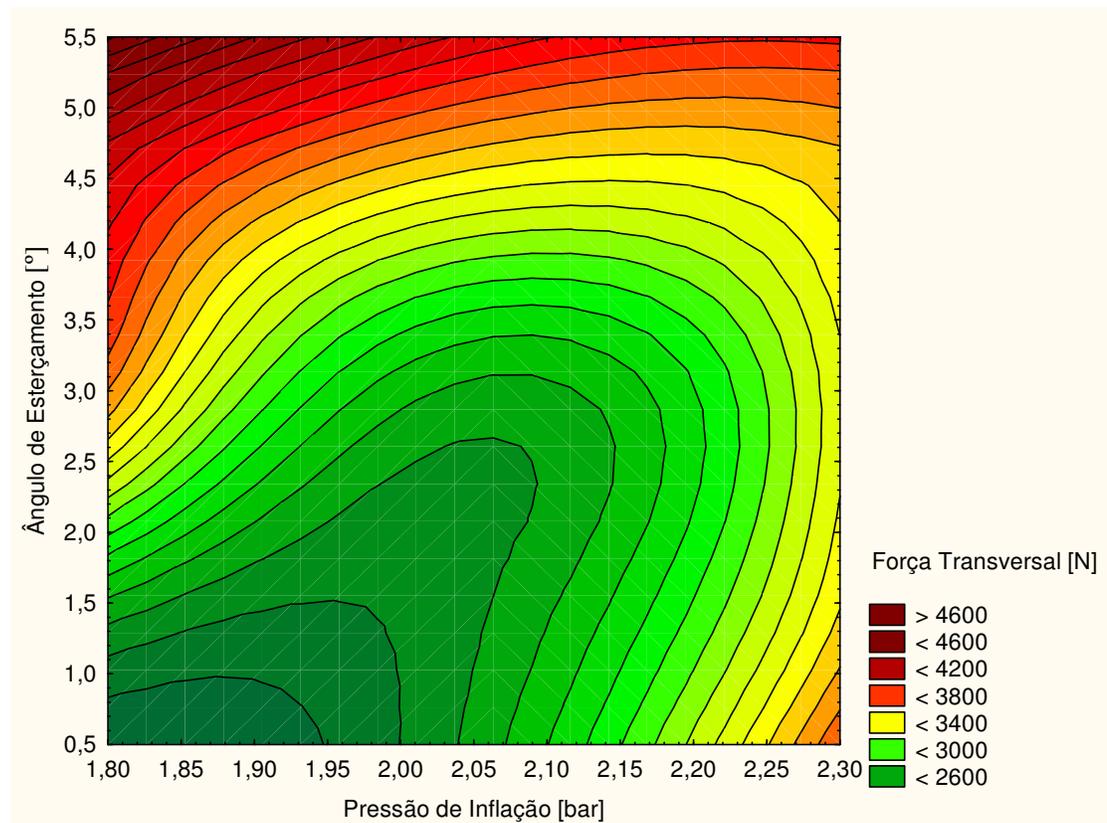


Figura 126: Variação da força transversal desenvolvida pelo pneu no piso asfáltico, com a variação da pressão de inflação e do ângulo de esterçamento. Fonte: Dados da pesquisa.

Verifica-se na figura 126 que aumento do ângulo de esterçamento na condição de menor pressão promove o aumento da força transversal, já se mantendo constante o ângulo de esterçamento e aumentando-se a pressão a força transversal diminui.

A figura 127 mostra a mesma relação que a figura 126, porém agora o piso utilizado nos testes de campo foi um solo compactado sem cobertura superficial. A resposta da força transversal se difere neste caso, o modelo nos mostra que o aumento do ângulo de esterçamento ainda causa o aumento da força, mas agora, o aumento da pressão também possibilita a melhora no desenvolvimento desta. Nota-se também que apenas o aumento do ângulo de esterçamento não proporciona o máximo desempenho do pneu, sendo necessário o aumento conjunto da pressão de inflação.

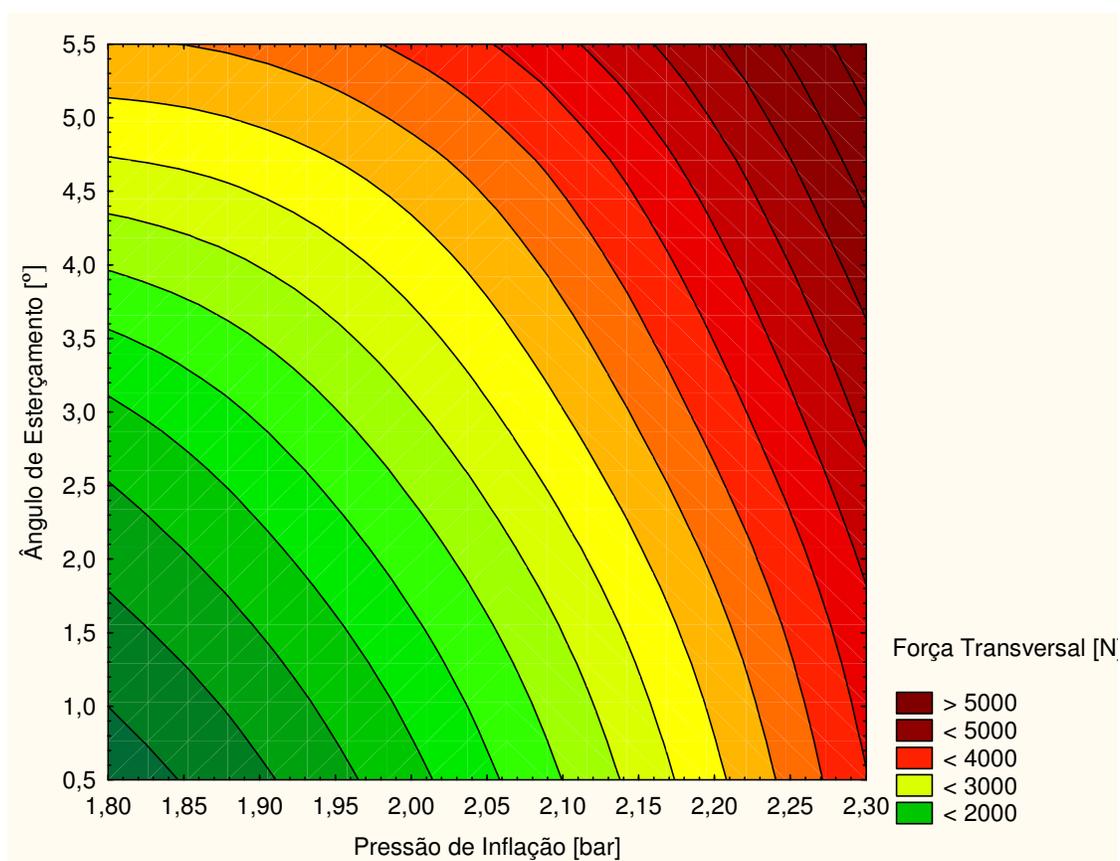


Figura 127: Variação da força transversal desenvolvida pelo pneu no piso macio sem cobertura, com a variação da pressão de inflação e do ângulo de esterçamento. Fonte: Dados da pesquisa.

Na figura 128, utilizando piso com solo compactado com cobertura superficial, o comportamento do pneu em desenvolver força transversal tem característica onde, quando se utiliza apenas o esterçamento como critério, o seu aumento para ângulos médios podem

favorecer a força, mas se elevado em excesso pode prejudicar o comportamento. Quando o ângulo de esterçamento é associado a pressões, com valores tendendo ao máximo em ambos os parâmetros, pode-se atingir o máximo desempenho do pneu.

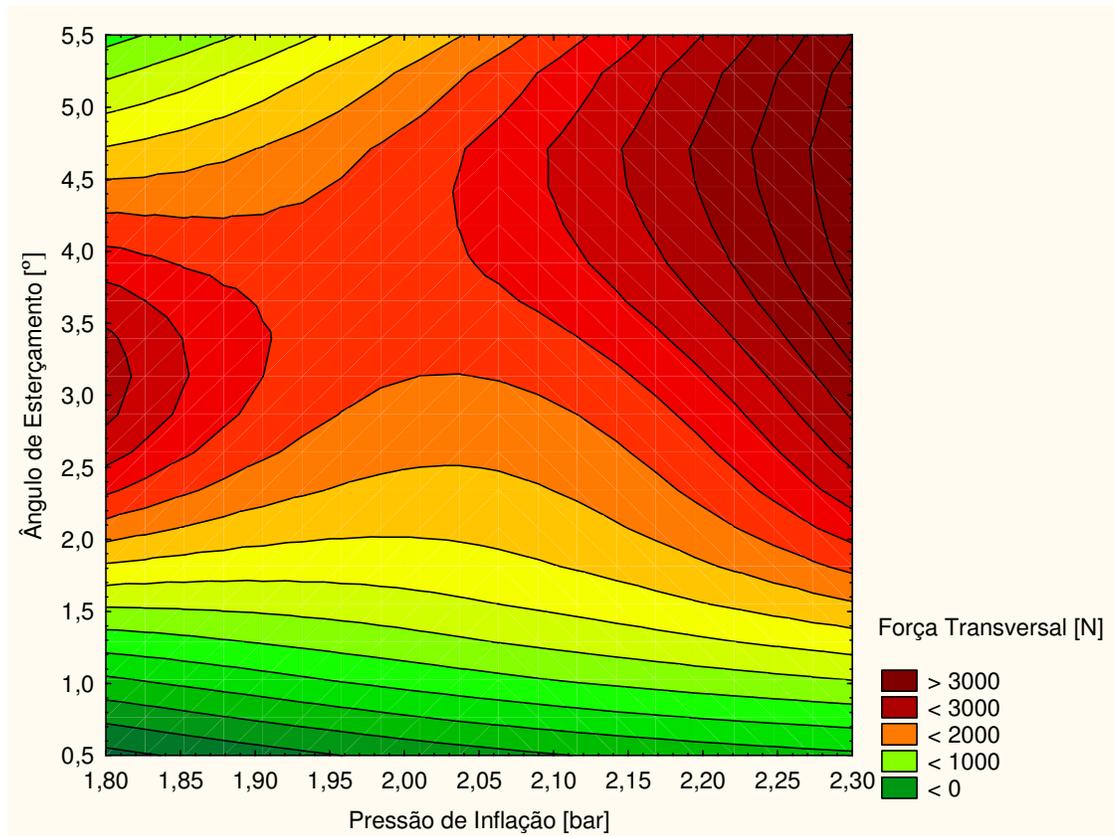


Figura 128: Variação da força transversal desenvolvida pelo pneu no piso macio com cobertura, com a variação da pressão de inflação e do ângulo de esterçamento. Fonte: Dados da pesquisa.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Os veículos que trafegam em terreno declivoso aplicam força transversal sobre as rodas que causa deformação do pneu e correspondente deriva da trajetória real com relação à desejada. O esterçamento das rodas de um eixo se torna necessário para corrigir essa deriva. Para manter o eixo longitudinal do equipamento tangente à linha de plantio se torna necessário que tanto o eixo dianteiro quanto o traseiro tenham recurso de esterçamento que permita corrigir a deriva de ambos os eixos.

O efeito de correção da deriva conseguido através do esterçamento pode ser eliminado pela falta de capacidade do pneu para suportar a componente transversal do peso do veículo provocada pela inclinação do terreno.

A capacidade de absorver força transversal de um pneu direcional (CFT) aumentou com o ângulo de esterçamento em qualquer dos pisos ensaiados, rígido ou macios.

A dureza do piso tem grande influência sobre a magnitude da CFT. Entre os pisos testados os mais rígidos possibilitaram forças transversais mais linearmente crescentes com o aumento do ângulo de esterçamento. Deste ponto de vista o conceito de controle de tráfego, sobre trilhas adensadas e permanentes, se apresenta como uma alternativa desejável para a mecanização de áreas declivosas.

O aumento da pressão de inflação provocou uma queda da CFT para qualquer ângulo de esterçamento sobre piso rígido. Para piso macio sem cobertura, o aumento da pressão provocou um aumento da CFT, porém para os maiores ângulo de esterçamento ocorre uma queda desta força, sugerindo que o piso superou sua resistência mecânica. Para o piso macio com cobertura, o aumento da pressão de inflação também causou um aumento da CFT, atingindo o valor máximo com o máximo de ângulo de esterçamento.

A maior força transversal encontrada ocorreu no piso rígido asfaltado, com a menor pressão de inflação e no piso macio sem cobertura com a maior pressão de inflação. A menor CFT encontrada foi no piso macio com cobertura na maior e na menor pressão de inflação. Deste ponto de vista o conceito de controle de tráfego sobre trilhas permanentes, em solo adensado e sem cobertura, utilizando pneus com maior pressão de inflação se apresenta como uma alternativa desejável.

Na menor pressão de inflação o aumento da carga vertical diminuiu a CFT tanto para piso rígido quanto para o piso macio com cobertura, sendo que não houve efeito no caso do piso macio sem cobertura, para qualquer ângulo de esterçamento. Com a maior pressão de inflação o efeito foi contrário indicando que a CFT se correlaciona positivamente com a carga vertical no pneu mais rígido e vice versa.

A ação de uma força longitudinal oriunda do torque aplicado à roda aumenta a rigidez do pneu ocasionando uma redução na deriva da trajetória e uma redução da CFT em qualquer dos pisos estudados.

As conclusões acima sustentam a hipótese proposta no sentido de que tanto o ângulo de esterçamento quanto o torque aplicado ao pneu contribuem para reduzir a deriva de trajetória gerada pela deformação lateral dos pneus que operam sobre terrenos inclinados.

O modelo matemático mais adequado para expressar a força transversal nos diferentes pisos, em função da pressão de inflação, ângulo de esterçamento e força vertical foi a regressão polinomial.

O sistema construtivo da roda dinamométrica apresentou resultados satisfatórios quando utilizada nos teste de campo, no entanto o procedimento de calibração deve ter a condição de se alterar o solo, podendo-se efetuar a calibração também em função do piso, que será proposto no capítulo de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 7 – TRABALHOS FUTUROS

Em função das dificuldades na execução alguns trabalhos futuros podem ser propostos, dentre eles:

- Modelar experimentalmente a linha equatorial do pneu utilizando as deformações encontradas no trabalho.

- Ampliar o sistema de aquisição de dados de forma a não usar fios, permitindo melhor liberdade de tráfego com a máquina.

- Ampliar os valores de ângulos de esterçamento das rodas direcionais visando conhecer melhor os limites do pneumático para pisos macios.

- Elaborar e construir um equipamento de calibração da roda dinamométrica independente do veículo teste.

- Estudar meios de construir uma roda dinamométrica com o mesmo recurso de avaliação do contato do pneu com o solo, porém com troca de pneu mais acessível possibilitando avaliar novos parâmetros de teste.

- Criar um modelo onde se possa através da calibração da roda dinamométrica, prever o comportamento do pneumático em qualquer circunstância de tipo de piso de tráfego.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAUNBECK, O.A.; OLIVEIRA, J.T.A.; Colheita de cana de açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p. 300-308, jan./abr.2006.

BEKKER, M.G. **Theory of land locomotion**. University of Michigan, Press Ann Arbor, 4th.ed. Michigan, 1956, 220 p.

CROLLA, D. A.; EL RAZAZ, A. S. A. A Review of the combined lateral and longitudinal force generation of tyres on deformable surfaces. **Journal of Terramechanics**, Vol.24, n. 3, p. 199-225, 1987.

DEL ROSARIO, C. R. **Lateral force investigations on steered pneumatic tyres operating under soil conditions**.1980. 115f. Tese (Doutorado) –Silso e College, Cranfield Institute of Technology.

DUGOFF, H., FANCHER, P., SEGEL, L. (1970). An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamics performance. In proceedings Fisita Int. Auto, Safety Conference, **SAE Paper** 700377.

FERHADBEGOVIC, B., KUTZBACH, H., BOTTINGER, S. Driving dynamics simulation of agricultural tractors using the Hohenheim Tyre Model. **Institute for Agricultural Engineering**, University of Hohenheim, Germany, Tire Expo 2007.

FERNÁNDEZ, A. O. **Desarrollo de técnicas experimentales em lamodelización de neumáticos**.2000. 195 f. Tese (Doutorado) – Área de Ingeniería Mecánica. Universidad de Málaga.

GEE-CLOUGH, D.; SOMMER, M. S. Steering forces undriven angled wheels. SCHWANGHART, H.; CROLLA, D. A. Vehicle Dynamics – Steering II. **Journal of Terramechanics**, Vol.18, n. 1, pp. 25-49, 1981.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1st ed. Michigan: SAE International,1992. 519p.

GOBBI, M.; MASTINU, AIOLFI, M.; G.;PREVIATI, G.; LEVI, F.; PENNATI, M; RIBALDONE, M. Measurement of the forces and moments acting on farm tractor pneumatic tyres. Politecnico di Milano, **Departmente of Mechanical Engineering**, Laboratory for the Safety of Transport, Via G. La Masa, Vehicle System Dynamics, Vol. 43, Supplement, 2005, 412-433.

GUO, K. e LU, D. Unified tire model for vehicle dynamics simulation. **Vehicle System Dynamics**, Republic of China, v. 45, p.79-99, 2007.

HARNISCH, C; LACH, B.; JAKOBS, R.; TROULIS, M.; NEHLS, O. A new tyre-soil interaction model for vehicle simulation on deformable ground. **Vehicle System Dynamics**, v. 43, p. 384-394, 2005.

JAZAR, R. N.; **Vehicle dynamics: Theory and application**. Dept. Mechanical Engineering, Manhattan College Riverdale, 1 st ed. New York: ISBN – 978-0-387- 74274, 2008. 1015 p.

MAZETO, F. R.A **avaliação das metodologias de determinação das áreas de contato e deformações elásticas de pneus agrícolas em função de duas pressões de inflação e cargas verticais**. 2004, 100 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

MIALHE, L.G. **Máquinas Motoras na Agricultura**. Vol. 2. São Paulo:Editora da Universidade de São Paulo, 1980.289 p.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. F. **Race car vehicle dynamics**.1 st ed. Michigan: SAE Inc., 1995. 980 p.

OIDA, S.; SETA, E.; HEGURI, H.; KATO, K. Soil/Tire interaction analysis using FEM and FVM². **Tire Science and Technology**, January 2005. v. 33, p. 38-62.

PACEJKA, H. B. **Tyre and vehicle dynamics**. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. p.620

PACEJKA, H. B.; SHARP, R. Shear force development by pneumatic tyres in steady state conditions. **Vehicle System Dynamics**, v. 20.p.121-176, 1991.

PLACKETT, C.W.; A review of force prediction methods for off-road wheels. **Journal Agric. Eng. Res.** v.31.p. 1-29, 1985.

RAMOS, D. D., **Modelo de contacto nemático-calzada a baja velocidad**. 2008. f.189. Tese (Doutorado) - Departamento de Ingenieria Macanica, Universidad Carlos III de Madrid.

RAHEMAN, H.; SINGH, R. Steering forces on undriven tractor wheel. Agricultural and Food Engineering Department, Indian Institute of Technology, India, **Journal of Terramechanics**, Kharagpur v.40, p.161-178, 2004.

REMPEL, A. F. **Estudo da Interação Pneu-solo para Veículos Fora de Estrada e Determinação de Parâmetros para o Desenvolvimento do Projeto Mini Baja**. 2006. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo Escola Politécnica.

SMITH, N. Understanding parameters influencing tire modeling. **Technical report**, Colorado State University, 2004 Formula SAE Platform.

UPADHYAYA, S.K.; WULFSOHN, D. Review of traction prediction equation. In ASAE- American Society of Agricultural Engineers, 12, St Joseph. **Anais...St. Joseph**: ASAE, 1990. (Paper 90-1573).