

JOSEPH KALIL KHOURY JUNIOR

ESTABILIDADE LATERAL DE TRATORES AGRÍCOLAS 4x2

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
OUTUBRO - 2000

JOSEPH KALIL KHOURY JUNIOR

ESTABILIDADE LATERAL DE TRATORES AGRÍCOLAS 4x2

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada em: 10 de fevereiro de 2000.

Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Conselheiro)

Prof. Ricardo Reis Cordeiro
(Conselheiro)

Prof. Luciano Baião Vieira

Prof. Mauri Martins Teixeira

Prof. Gutemberg Pereira Dias
(Orientador)

À minha esposa Denise.

Aos meus filhos Viviane e Fuad.

Aos meus pais Joseph e Maria.

À minha avó Dalila.

AGRADECIMENTO

A Deus, por tudo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso e pelos ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento do projeto.

Ao Professor Gutemberg Pereira Dias, pela orientação na feitura do presente trabalho e, sobretudo, pela confiança e amizade.

Aos Professores Daniel Marçal de Queiroz e Ricardo Reis Cordeiro, pelo apoio, pelas críticas e pelas sugestões no decorrer do trabalho.

Aos colegas da pós-graduação em mecanização, Cristiano, Jackson, Edney, Elton, Roberto Carlos, Luciano, Ricardo, Leidy, Antônio Donizete, Carlos Alberto, Anderson, José Luiz e Renildo, pelo apoio, pela troca de experiências e amizade.

Aos estagiários e amigos Cássio, Cezar, Roberto Milagres, Franklin e Paulo Cardoso, pelos serviços de apoio durante a condução do trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Mecanização Agrícola, Marcelo do Carmo, Danilo, Wantuil, Geraldo e Pedro, pela colaboração e pelos serviços prestados.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, Álvaro, Edna, Fernanda, Marcos, Francisco, Zé Mauro e Galinari, pelos serviços prestados.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial a Luciano Baião, Haroldo Fernandes, Mauri Teixeiras, Francisco Pinto, Delly, Sandra e Julião, pela colaboração e pelo apoio.

Aos funcionários e professores do Laboratório de Materiais de Construção, pelos serviços e ensaios realizados no material utilizado na estrutura de proteção do trator.

À minha esposa Denise Andrade Khoury e sua família, em especial a seus pais Maria Halfa e Lacyr Andrade, pelo estímulo, pela compreensão e pelo apoio nos momentos de dificuldade.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para que esta pesquisa fosse realizada.

BIOGRAFIA

JOSEPH KALIL KHOURY JUNIOR, filho de Joseph Kalil El-Khoury e Maria da C. Brumano Kalil, nasceu em São Miguel do Anta, Minas Gerais, no dia 25 de janeiro de 1966.

Em agosto de 1990, graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa.

Trabalhou na iniciativa privada de 1986 a 1996, como administrador, em empresas do ramo de confecções e loteamento.

Em março de 1997, foi contratado pela Prefeitura Municipal de Viçosa para lecionar matemática para pré-vestibular, exercendo a função até iniciar o mestrado.

Em agosto de 1997, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa – MG, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2000.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
EXTRATO	XI
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Acidentes	4
2.2. Estabilidade de tratores agrícolas	5
2.3. Propriedades físicas dos pneus.....	11
2.3.1. Constante de rigidez de pneus agrícolas.....	11
2.3.2. Coeficiente de aderência dos pneus agrícolas.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Determinação do centro de gravidade do trator	13
3.2. Programa computacional.....	17
3.2.1. Cálculo das reações verticais e laterais nos pneus.....	18
3.2.2. Cálculo das deformações dos pneus.....	28
3.2.3. Cálculo da inclinação lateral do chassi pelo efeito das deformações dos pneus	30
3.2.4. Limite de estabilidade por tombamento lateral, incluindo deformações dos pneus	31
3.2.5. Tombamento longitudinal.....	36
3.3. Solução do modelo para perda da estabilidade por deslizamento	36

	Página
3.4. Procedimento experimental	38
3.4.1. Construção de uma pista de concreto padronizada	39
3.4.2. Estrutura de proteção	41
3.4.3. Direcionamento e controle do trator nos testes	44
3.4.4. Testes experimentais.....	44
3.4.5. Testes comparativos entre os valores simulados pelo modelo desenvolvido, as equações propostas por ASHBURNER e SIMS e MIALHE e os dados experimentais.....	49
3.4.6. Simulações para estudo do comportamento do trator em situações diversas de operação e análise de sensibilidade das medidas geométricas e ponderais do trator	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1. Centros de gravidade e massas e medidas do trator utilizados na simulação.....	55
4.2. Verificação dos valores simulados e experimentais.....	56
4.3. Simulações para estudo do comportamento do trator em situações diversas de operação e análise de sensibilidade das medidas geométricas e ponderais do trator.....	65
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
APÊNDICES	77
APÊNDICE A	78
APÊNDICE B	90
APÊNDICE C	90
APÊNDICE D	95

LISTA DE SÍMBOLOS

- b = largura da banda de rodagem do pneu, m.
- B = bitola do trator, m.
- B_f = bitola frontal, m.
- B_t = bitola traseira, m.
- C_{ext} = raio de curva no limite externo da pista de teste, em função de λ , m.
- cg = centro de gravidade.
- cgf = centro de gravidade da massa do eixo frontal.
- cgp = centro de gravidade parcial (massa total, subtraída a massa do eixo frontal).
- cgt = centro de gravidade da massa total do trator.
- CI = índice de cone, Pa.
- C_{int} = raio de curva no limite interno da pista de teste em função de λ , m.
- C_m = raio de curva no limite externo da pista inclinada, em função de λ , m.
- cn = adimensional do pneu.
- D = declividade do plano de apoio, %.
- d = diâmetro externo do pneu indeformado, m.
- D_{ijk} = deformação lateral do pneu na posição j , lado k , m.
- D_{lt} = deformação lateral resultante dos pneus traseiros, m.
- D_{vjk} = deformação vertical do pneu na posição j , lado k , m.
- D_{vt} = deformação vertical resultante dos pneus traseiros, m.
- E = módulo de elasticidade do material utilizado na estrutura, $N \cdot m^{-2}$.
- erro = erro relativo médio, %.

$F_{a_{fdn}}$ = força de aderência lateral do pneu frontal direito, sobre a pista plana, N.
 $F_{a_{fk}}$ = força de aderência lateral do pneu, posição j , lado k , N.
 $F_{a_{tdn}}$ = força de aderência lateral do pneu traseiro direito, sobre a pista plana, N.
 FBT = força na barra de tração, N.
 F_i = força de impacto, N.
 g = aceleração da gravidade, $m.s^{-2}$.
 G_{jk} = altura da garra do pneu, posição j , lado k , mm.
 H = altura do centro de gravidade do trator, m.
 h_{st} = altura de levantamento do bloco em função do peso do trator, m.
 i = localização do cgt, cgf e cgp.
 J = momento de inércia da peça utilizado na estrutura, m^4 .
 j = posição pneu (f = frontal, t = traseiro)
 k = lado pneu (d = direito, e = esquerdo)
 K_f = razão entre a força lateral e a força vertical dos pneus frontais.
 K_{ljk} = constante rigidez lateral, posição j , lado k , $kN.m^{-1}$.
 K_t = razão entre a força lateral e a força vertical dos pneus traseiros
 K_{vjk} = constante rigidez vertical, posição j , lado k , $kN.m^{-1}$.
 L = comprimento do menor vão da peça na estrutura, m.
 L_{fdn} = reação lateral do pneu frontal direito, sobre uma pista plana, N.
 L_{jk} = reação lateral do pneu em posição j , lado k , N.
 L_{tdn} = reação lateral do pneu traseiro direito, sobre uma pista plana, N.
 m_f = massa do eixo frontal excluída a massa parcial, kg.
 m_p = massa do trator descontado o eixo frontal, kg.
 m_{tf} = massa total do trator, kg.
 P_{jk} = pressão de enchimento do pneu, posição j , lado k , kPa.
 r = raio de curva do trator em relação ao eixo traseiro, m.
 R_{jk} = reação vertical no pneu, posição j , lado k , N.
 R_m = reação vertical no mancal do eixo frontal, N.
 R_t = raio do rodado traseiro, m.
 R_{tdn} = reação vertical na pista plana do lado direito, N.
 T_{jk} = resistência ao rolamento do pneu, posição j , lado k , N.
 T_m = reação longitudinal no mancal do eixo frontal, N.
 V = velocidade deslocamento do trator, $m.s^{-1}$.
 v_i = velocidade de impacto do bloco na estrutura, $m.s^{-1}$.

W_b = carga estática do bloco(19640 N - NBR 10001), N.
 W_d = reação do lado direito do trator, N.
 W_f = reação do eixo frontal com o trator no plano, N.
 $W_{f\beta}$ = reação do eixo frontal com o trator inclinado, N.
 X_i = distância horizontal do plano de referência transversal traseiro ao cg, m.
 X_L = distância entre eixos, m.
 $X_{L\beta}$ = projeção da distância entre eixos no piso com o trator inclinado, m.
 Y_i = distância horizontal do plano médio longitudinal ao centro de gravidade, m.
 Y_p = distância transversal entre a linha AB e o plano vertical do cgp, m.
 Z_i = distância vertical do plano de apoio ao centro de gravidade, m.
 Z_m = altura do mancal no eixo frontal ao plano de apoio, m.
 Z_p = distância vertical entre a linha AB e o plano horizontal do cgp, m.
 λ = ângulo de posição do deslocamento do trator na pista de teste, radianos.
 θ = ângulo de inclinação da pista, graus.
 β = ângulo de inclinação longitudinal do trator com o plano horizontal, graus.
 φ = ângulo de posição do trator em relação ao deslocamento na pista, graus.
 θ_L = ângulo de inclinação-limite da pista, graus.
 θ_{ch} = ângulo de inclinação lateral do chassi, graus.
 θ_{chL} = ângulo de inclinação lateral do chassi limite, graus.
 θ_{dl} = ângulo de inclinação lateral devido às deformações dos pneus, graus.
 $\theta_{exp.}$ = ângulo de inclinação observado experimentalmente, graus.
 θ_{ps} = ângulo de inclinação da pista onde opera o trator, graus.
 θ_{st} = ângulo de inclinação-limite para tombamento lateral estático, graus.
 δ = ângulo de esterçamento dos pneus frontais, graus.
 δ_{st} = deformação estática (flecha decorrente da carga estática na peça), m.

EXTRATO

KHOURY JR., Joseph Kalil, M.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2000. **Estabilidade de tratores agrícolas 4x2**. Orientador Gutemberg Pereira Dias. Conselheiros: Daniel Marçal de Queiroz e Ricardo Reis Cordeiro.

Os acidentes de trabalho na agricultura envolvendo tratores são graves, podendo inclusive levar ao óbito. No Brasil, os estudos sobre estabilidade de tratores são poucos. Neste sentido, o presente trabalho teve por objetivos desenvolver um modelo matemático para previsão da perda da estabilidade de trator agrícola, sem implemento acoplado, sob condição dinâmica, e fazer sua verificação em uma pista padronizada. No modelo são utilizadas as medidas geométricas e ponderais do trator e da condição deste na pista. Na verificação experimental do modelo, foram projetadas e construídas uma pista para testes de tombamentos laterais e uma estrutura para proteção do trator contra tombamentos. Utilizou-se um trator 4x2, de tamanho real, para realização dos testes experimentais. Com base nos resultados obtidos na comparação dos ângulos-limite de tombamentos dos valores simulados e experimentais, pôde-se concluir que o modelo computacional desenvolvido foi capaz de prever a perda da estabilidade do trator com margem de erro médio de 5,5%. O segundo estágio do tombamento sempre ocorreu nos testes realizados experimentalmente, partindo do fato de que a energia adquirida pelo chassi no primeiro estágio do tombamento é capaz de dar continuidade a este quando o chassi colide com o eixo frontal. Na outra etapa do trabalho, foram realizadas simulações com o trator estudado em situações diferentes das usadas para

verificação do modelo. Tendo em vista os resultados obtidos pelas simulações, conclui-se que, nas simulações em que se variaram as posições do trator sobre uma pista inclinada até o tombamento lateral, o ângulo de posição igual a 60° foi o que apresentou pior situação, o que corresponde ao fato de o trator descer por uma diagonal em uma pista inclinada para esquerda. Nas simulações em que se variaram as medidas geométricas e ponderais do trator, a bitola e a localização do centro de gravidade na coordenada vertical foram os fatores que mais afetaram a estabilidade do trator em tombamentos laterais. Já a localização do centro de gravidade na coordenada longitudinal e a distância entre eixos afetaram mais a estabilidade do trator em tombamentos para trás. As equações empíricas utilizadas no programa computacional para prever a força de aderência dos pneus mostraram que, em quase todas as simulações, o trator deslizava os rodados do lado do tombamento ou perdia a dirigibilidade dos pneus frontais com ângulos inferiores aos limites de estabilidade por tombamento.

ABSTRACT

KHOURY JR., Joseph Kalil, M.S., Universidade Federal de Viçosa, October of 2000. **Stability of agricultural tractors 4x2**. Adviser: Gutemberg Pereira Dias. Committee Members: Daniel Marçal de Queiroz and Ricardo Reis Cordeiro.

The accidents in the agriculture involving tractors are serious and can take out human lives. In Brazil, the studies about tractors stability are few. Thus, mathematical model was developed a in this research to predict the loss of tractor stability. The model was verified under dynamic conditions on a standardized track, with no implement attached to the tractor. In order to predict the loss of tractor stability, the mathematical model was implemented based on the tractor geometry and weight and on some information about the tractor placement on the track. To verify the experimental the model, it was designed and built a test track to overturn the tractor on its side. It was also built a structure on the tractor to protect it during the overturning tests. It was used a real 4x2 tractor. Comparing the experimental to the model estimated tractor-overturning angle, it was concluded that the developed model was capable to predicting the stability loss with average error of 5,5%. The second tractor overturn stage happened in all track tests since the energy acquired by the tractor chassis on the first tractor overturning stage was enough for keeping the overturning process when the chassis collides to the front axis. The model was also used to simulate situations different from those used in the model verification tests. Simulating different tractor positions on an inclined track until its side overturn, the tractor angle position of 60° presented the worst situation,

what represented a tractor moving diagonally down on a left inclined track. Changing the tractor geometry and weight in the simulations, the vertical position of tractor central mass and its tread width were the parameters that most affected the tractor stability to side overturn. The longitudinal position of tractor central mass and the distance between its axes influenced on the tractor stability to rearward overturning. The empiric equations used in the model to predict the tire adherence forces showed in most of simulations that the tractor either slip the wheels at the side overturning or lost the front tire controlling at angles less than the overturning limits.

1. INTRODUÇÃO

A segurança no trabalho, a cada dia, torna-se mais importante na consciência das organizações governamentais. Em abril de 1999, em São Paulo, representantes de 74 países reuniram-se no XV Congresso Mundial sobre Segurança e Saúde no Trabalho, tendo como tema o impacto da globalização no universo do trabalho, com destaque para a preocupação das organizações mundiais com a segurança do trabalho. Hoje, 90% da população mundial está inserida no processo de globalização. A afirmação foi feita pelo diretor da OIT (Organização Internacional do Trabalho) para as Américas, que foi um dos participantes do evento, o qual salientou que a maior competitividade entre empresas não deve gerar redução de custos sociais e menor investimento em saúde e segurança do trabalhador. Pelo contrário, as empresas têm a obrigação de capacitar cada vez mais seus empregados e melhorar as condições do ambiente de trabalho (FUNDAÇÃO..., 1999).

Um grupo de especialistas em segurança e extensão agrícola da Universidade de Ciência e Tecnologia do Estado de Iowa, nos EUA, desenvolveu, em 1994, um material sobre segurança em fazendas. Concluiu-se, nesse estudo, que os tratores são comuns a todas as operações da fazenda, sendo também a principal causa de morte na agricultura atualmente. Pela estimativa do Conselho de Segurança Nacional daquele país, em 1990 morreram 460 pessoas operando trator. Aproximadamente 52% dessas mortes eram resultado de tombamento de trator. Também de acordo com este órgão, a alta taxa de mortalidade associada a tombamentos de trator não é um

problema novo. Desde 1970, o trator tem sido a causa principal de mortes de operador. Estatísticas sobre acidentes com tombamentos de tratores durante as duas últimas décadas mostram que aproximadamente cinco pessoas morreram a cada ano para 100.000 tratores em operação. A estrutura de proteção contra tombamentos começou a ser comercializada em tratores em 1965. Muitos tratores velhos, usados hoje, não têm estrutura de proteção contra tombamentos. Nos Estados Unidos, desde 1985, fabricantes de trator adotaram um padrão, para que os tratores sejam vendidos com estrutura de proteção. Atualmente os tratores já vêm equipados com a estrutura de proteção contra tombamentos e com cintos de segurança (SCHWAB et al., 1994).

O trator é uma das máquinas mais utilizadas na agricultura e tem recebido diversas melhorias para aumentar sua eficiência, seu conforto e sua segurança nas operações. Os acidentes de trabalho na agricultura envolvendo tratores são graves, podendo inclusive levar a óbito. No Brasil, os trabalhadores rurais só procuram assistência médica quando o acidente é grave. Além disso, a distância entre as propriedades rurais e os postos de atendimento faz com que somente as pessoas em estado grave, ou com lesões agravadas, cheguem ao conhecimento do órgão responsável, razão para falhas nas estatísticas existentes sobre acidentes. Adicionam-se a isto o desconhecimento da legislação por parte de patrões e empregados e o receio, em certos casos, do proprietário em encaminhar seu empregado acidentado ao órgão competente. Em estudo realizado pelo FUNDACENTRO, em 1979, estima-se que, de 85% dos acidentes fatais, envolvendo tratores agrícolas, 70% são devidos a quedas laterais e 15% a quedas para trás.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos no âmbito internacional, visando prever o momento em que ocorre a instabilidade do trator. Geralmente eles se baseiam no uso da simulação e na execução de trabalhos experimentais, objetivando conhecer parâmetros para o estudo da segurança do operador.

No Brasil, os estudos sobre estabilidade de tratores são poucos e raros, e, neste sentido, especialmente para atender às regiões de topografia acidentada e tipicamente agrícola, justifica-se iniciar uma série de estudos que permitam estabelecer recomendações e procedimentos para operação de

tratores agrícolas em locais de topografia acidentada, minimizando os prejuízos financeiros e sociais.

Este trabalho teve por objetivos desenvolver um modelo matemático para previsão da perda da estabilidade de trator agrícola, sem implemento acoplado, sob condição dinâmica, e fazer sua verificação em uma pista padronizada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Acidentes

Um dos problemas para o estudo dos acidentes de trabalho na agricultura brasileira é a falta de dados, sejam eles de natureza estatística ou técnica. Apesar de os órgãos governamentais não disporem de dados atualizados sobre acidentes de tratores, os poucos estudos realizados no Brasil mostram que o trator é o maior causador de acidentes fatais na agricultura. No âmbito internacional, em que se encontram dados estatísticos mais recentes, o trator ainda é o maior causador de acidentes fatais na agricultura. Devido ao uso de equipamentos de proteção e às orientações nas operações com tratores, tem-se conseguido diminuir os prejuízos sociais e econômicos causados pelos acidentes.

MURPHY (1999) avaliou o uso de um manual de segurança agrícola e saúde nas práticas de administração (ASHBMP), uma ferramenta recentemente criada que promove atividades, visando à redução de perigo em fazendas. O ASHBMP utiliza os conceitos de melhores práticas de administração colocadas à disposição do usuário, que serão usadas pelos representantes de companhias de seguros e fazendeiros, e indica perigos de trabalho na fazenda e seu controle. O trator foi uma das máquinas selecionadas na avaliação para testar a eficácia do ASHBMP em fazendas da Pensilvânia. Este manual indica as operações inseguras e o seu controle, sendo considerado uma ferramenta efetiva para reduzir perigos em fazendas.

ROBIN (1987) relata que no Estado de São Paulo, no ano agrícola 1975/1976, em um total de 110.700 acidentes de trabalho ocorridos em 28.300 propriedades agrícolas, 13.700 foram causados pelo uso de tratores e máquinas agrícolas, resultando na morte de 2.000 pessoas.

Segundo DIAS et al. (1993a), o valor do capital humano e a necessidade econômica de manter o trabalhador produzindo sistematicamente são itens de grande importância para o empresário rural. Estudos realizados pela FUNDACENTRO (1978) demonstram que as despesas sob responsabilidade do empresário rural, resultantes de acidentes com máquinas agrícolas (como salários do acidentado, valor dos danos causados à máquina, tempo de atendimento à vítima e outros), podem aumentar de 8 a 10 vezes os custos para os órgãos de governo (assistência médica, reabilitação profissional, etc.).

Em 1974, o Brasil perdeu cerca de 1% de seu Produto Nacional Bruto (PIB) em consequência de trabalhadores acidentados que ficaram impossibilitados de trabalhar (FUNDACENTRO, 1978). Além desses fatores, é necessário lembrar que o operador, como ser humano, merece respeito e que seu treinamento, em certos casos, além de consumir muito tempo, tem elevados custos.

DELGADO (1991), em estudo sobre acidentes na utilização de tratores agrícolas, apresentou dados estatísticos para mostrar que: em acidentes fatais ocorridos por mecanização, 60% são por tombamentos de tratores; na Alemanha, no ano de 1954, com o emprego de equipamento de proteção em tratores contra tombamentos, em um período de 10 anos, curiosamente diminuiu em 50% o número de mortes causadas pela utilização de tratores; e metade dos acidentes de tombamento ocorridos em tratores sem estrutura de proteção é fatal.

2.2. Estabilidade de tratores agrícolas

Segundo MIALHE (1980), o estudo das forças em equilíbrio, que agem sobre o chassi do trator, tem fundamental importância para a compreensão de certos fenômenos que ocorrem durante sua utilização no campo. O conhecimento das condições de equilíbrio permite utilização mais segura do

trator, evitando-se riscos de acidentes, principalmente em terrenos de topografia acidentada, sendo a declividade-limite para tombamento lateral calculada pela relação:

$$D = \frac{100B}{2H} \quad \text{eq.(1)}$$

em que

D = declividade do plano de apoio (%);

B= bitola do trator (m); e

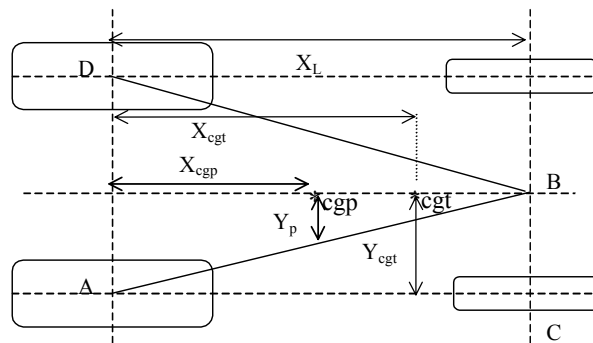
H= altura do centro de gravidade do trator (m).

O tombamento começará quando a reação normal do solo nas rodas laterais dispostas na parte superior da rampa se reduzir a zero. Essa relação, no entanto, considera o trator como um corpo completamente rígido apoiado sobre quatro pontos de apoio, o que é uma simplificação, pois o trator tem efetivamente três pontos de apoio sobre o solo, para efeito de avaliação do início de perda de estabilidade.

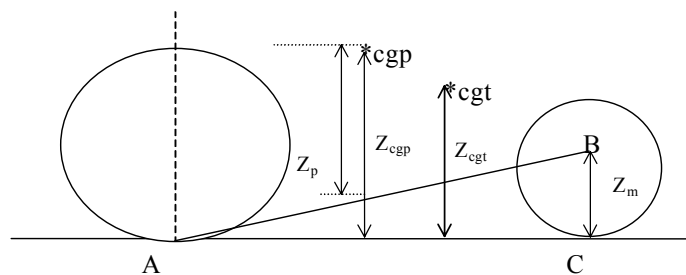
Quanto maior for a velocidade de deslocamento, mais intensamente se manifesta a ação dos processos dinâmicos, que podem provocar o tombamento lateral de uma máquina. Devido a esse fato, recomenda-se que a inclinação do terreno que permite a estabilidade dinâmica durante a realização de uma operação esteja entre 40 e 60% da inclinação-limite máxima determinada em condição estática (CHUDAKOV, 1977; MIALHE, 1980).

Segundo DIAS et al. (1993a), os primeiros estudos sobre estabilidade consideravam o trator 4x2 como um corpo rígido com quatro pontos de apoio e a massa total do trator localizada no centro de massa, ou centro de gravidade total (cgt). Mais recentemente, passou-se a considerar este apoio em somente três pontos e com dois estágios de tombamento, nos quais o primeiro considera a massa parcial do trator (massa total menos o eixo frontal), localizado no centro de gravidade parcial (cgp), e o segundo considera a massa total do trator no centro de gravidade total. O primeiro estágio inicia-se com movimento de giro em torno da linha AB, Figura 1(a), ou seja, da linha

entre o ponto de contato da roda traseira com o solo e o mancal que liga o eixo frontal ao chassi do trator. O segundo estágio de tombamento ocorre em torno da linha AC, e sua ocorrência dependerá da energia acumulada pelo cgp do trator no primeiro estágio. Se a energia cinética acumulada for maior que a energia exigida para girar o cgt, quando ocorre o impacto do chassi com o eixo frontal, o movimento pode continuar e ocorrer o giro lateral sobre o eixo AC, Figura 1(b).



a - vista superior



b - vista lateral

Figura 1 - Pontos de apoio do trator agrícola 4x2 de pneus e localização do cgp e cgt.

Sob condição estática, a declividade-limite (D) é calculada pela equação proposta por ASHBURNER e SIMS (1984), modificada por DIAS et al. (1993a) quanto a localização do cg (cgt para cgp):

$$D = \frac{Y_p}{Z_p} \cdot 100 \quad \text{eq. (2)}$$

em que

Y_p = distância transversal entre a linha AB e o plano vertical do cgp (m); e

Z_p = distância vertical entre a linha AB e o plano horizontal do cgp (m).

De acordo com ASHBURNER e SIMS (1984), se um trator se desloca em movimento circular em uma pista inclinada, atua uma força centrífuga adicional no centro de massa, acrescida à força-peso que contribui para a instabilidade lateral inicial. Quando a força resultante passar pela linha AB, a velocidade-limite pode ser calculada:

$$Y_p = \frac{B (X_L - X_{cgp})}{2 X_L} \quad \text{eq. (3)}$$

$$Z_p = Z_{cgp} - \frac{Z_m X_{cgp}}{X_L} \quad \text{eq. (4)}$$

$$\theta_{st} = \arctan\left(\frac{Y_p}{Z_p}\right) \quad \text{eq. (5)}$$

$$V = \sqrt{\frac{\text{sen}(\theta_{st} - \theta_{ps})}{\text{sen}(90 - \theta_{st})}} gr \quad \text{eq. (6)}$$

em que

B = bitola do trator (m);

X_L = distância entre eixos (m);

X_{cgt} = distância do eixo traseiro ao centro de gravidade (m);

Z_m = altura do mancal no eixo frontal (m);

θ_{st} = ângulo de inclinação-limite para tombamento lateral estático (graus);

θ_{ps} = ângulo de inclinação da pista onde opera o trator (graus);

g = aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$);

r = raio de curva do trator (m); e

V = velocidade-limite de deslocamento ($m \cdot s^{-1}$).

Z_{cgp} = distância vertical do plano de apoio ao cgp, (m).

A constante elástica dos pneus na direção transversal ao deslocamento do trator é uma variável que altera a sua bitola efetiva. DIAS et al. (1993b) propuseram uma metodologia para estudar a influência das deformações dos pneus e concluíram que as diferenças das declividades-limite estáticas, em relação à deformação dos pneus, devido ao acréscimo de lastro, podem atingir 10% para condição sem lastro e 5,3% com lastro, quando calculadas por meio da equação proposta por ASHBURNER e SIMS (1984), citada anteriormente, para condição de tombamento estático.

Por meio de simulações em computadores, REHKUGLER et al. (1976) estudaram o comportamento dos tratores em acidentes com o tombamento lateral. O modelo foi validado comparando-se os resultados simulados com os resultados experimentais, utilizando-se tratores em escala reduzida, ensaiados em pista construída especificamente para este estudo. Estes autores concluíram que os efeitos dos parâmetros pneu/solo têm grande influência no estudo da estabilidade de tratores. Para condições idênticas de pneus, o trator foi testado em superfície de solo, na qual ocorreu o seu tombamento, e em superfície de concreto, na qual o trator deslizou, saltou e rodou para um lado e outro, sem perder a estabilidade lateral.

Para KIM e REHKUGLER (1987), o conhecimento preciso das forças laterais nos pneus é de grande importância na simulação do trator.

REHKUGLER (1982) estudou o comportamento do trator com movimento em curva e sob alta velocidade numa superfície caracterizada por solo leve. Nesse estudo o autor utilizou o programa SIMTRAC (simulação da estabilidade lateral de tratores agrícolas), no qual foram considerados os coeficientes de força lateral e tração. Concluiu-se que essas propriedades devem ser precisas, para uma simulação correta do movimento do trator.

DU PLESSIS e VENTER (1993) afirmaram que o conhecimento do coeficiente de aderência relacionado à força lateral é necessário para o estudo da tração e da estabilidade de tratores que trafegam em rampas.

LILJEDAHN et al. (1989) apresentaram uma análise tridimensional das forças aplicadas em um trator triciclo em movimento, na qual se considerou que o trator tem velocidade longitudinal constante e que está subindo uma rampa lateral. Para simplificar a análise das forças, considerou-se que o centro de gravidade e o ponto de aplicação da força na barra de tração estão em um

mesmo plano vertical, que contém a linha longitudinal do centro de gravidade do trator. A fim de determinar as forças atuantes no trator, fez-se o balanço das forças e dos momentos nas direções dos eixos X, Y e Z (Figura 2). Nessa análise, a resistência ao rolamento do pneu ao solo (T_{jk}) é determinada pela equação proposta AMERICAN...-ASAE (1990):

$$T_{jk} = R_{jk} \left(\frac{1,2}{cn} + 0,04 \right) \quad \text{eq.(7)}$$

em que

cn = adimensional do pneu;

T_{jk} = resistência ao rolamento dos pneus (N);

R_{jk} = reação vertical no pneu (N);

j = localização frontal e traseira dos pneus; e

k = localização direita e esquerda dos pneus.

Assume-se que o trator é equipado com um diferencial que entrega torques iguais em cada pneu traseiro, o que é equivalente a dizer que as forças de tração, nos rodados traseiros, são iguais. A relação final vem do fato de que as rodas traseiras operam com ângulos de patinação iguais; então, o coeficiente que determina a razão entre a força lateral e a força vertical dos pneus traseiros é igual, conforme a equação:

$$\frac{L_{td}}{R_{td}} = \frac{L_{te}}{R_{te}} \quad \text{eq. (8)}$$

em que

L_{tk} = reação lateral paralela ao piso (t = traseiro, lado k), (N); e

R_{tk} = reação vertical do solo-pneu (t = traseiro, lado k), (N).

Com essas equações, propostas anteriormente, é possível determinar as reações em cada pneu.

A análise apresentada por LILJEDAHN et al. (1989) não leva em consideração a força centrífuga. Entretanto, esta força pode ser incluída na análise citada anteriormente, na condição de um trator trafegando em uma pista inclinada, fazendo curva. Para isso, é necessário acrescentar na análise a força centrífuga atuando no centro de gravidade do trator. Utilizando-se as mesmas equações dos balanços de forças e momentos, é possível determinar as reações verticais e laterais que atuam nos pneus do trator.

2.3. Propriedades físicas dos pneus

A reação vertical sobre os pneus é uma importante variável na análise da estabilidade, pois, quando se inicia o movimento do trator em terreno inclinado, ocorre a transferência de peso devido à inclinação, e, quando ele realiza curva, ocorre a ação da força centrífuga sobre o centro de gravidade, fazendo com que se acrescente uma carga dinâmica atuando nos pneus. Em razão da diferença da carga dinâmica vertical e lateral sobre os pneus do lado direito para o esquerdo, ocorrem deformações diferentes de um lado e do outro, resultando em aumento da inclinação do trator em relação à pista, o que diminui a estabilidade lateral deste.

Segundo LARSON et al. (1976), a força lateral desenvolvida nos pneus de tratores agrícolas está associada ao manejo destes. Para estes autores, geralmente essas forças laterais podem causar o giro lateral, em vez do tombamento do trator em condição dinâmica. Essa força lateral é decorrente de diversas variáveis, incluindo carga normal, pressão de enchimento e construção do pneu, além das condições do solo no qual o pneu é utilizado.

2.3.1. Constante de rigidez de pneus agrícolas

BROWN (1984) conceitua a constante de rigidez como a razão entre a carga aplicada e o deslocamento devido a esta carga. A razão inversa é denominada, por este autor, constante elástica.

Para determinar as deformações vertical e lateral de cada pneu, é preciso conhecer as suas reações vertical e lateral e as constantes de rigidez vertical e lateral. Fazendo a razão entre as reações vertical e lateral pelas constantes de rigidez vertical e lateral, têm-se a deformação vertical e a lateral, respectivamente, de cada pneu.

De acordo com INOUE (1997), podem-se estimar as constantes de rigidez vertical e lateral de pneus por equações empíricas obtidas por regressão. Em seu estudo, foram determinadas equações para pneus traseiros tipo R1 - diagonal, seis lonas e medidas 14.9 – 28, com altura de garra de 0,0; 12,0; e 29,0 mm, e pneus frontais do tipo F1 - diagonal, oito lonas e medidas 7.50 – 16, com alturas de friso de 0,0; 15,0; e 23,0 mm, utilizando ar para seu enchimento.

2.3.2. Coeficiente de aderência dos pneus agrícolas

É comum ocorrer o deslizamento dos pneus no solo em decorrência da ação de forças laterais sobre os rodados, sejam estas devido ao componente do peso em uma pista inclinada, ou à ação da força centrífuga, ou mesmo das duas em conjunto. Só não ocorre deslizamento se a força de aderência dos pneus ao solo for maior que a reação lateral.

McMULLAN et al. (1988) desenvolveram um equipamento com o intuito de determinar o coeficiente de aderência lateral dos pneus. Este equipamento consistia em uma estrutura acoplada ao sistema hidráulico do trator, que arrastava o pneu, permitindo o registro da força em função da carga vertical e da pressão de enchimento.

INOUE (1997), utilizando metodologia semelhante à de McMULLAN et al. (1988), determinou equações ajustadas estatisticamente com base em dados obtidos experimentalmente, a fim de estimar a força lateral em pneus traseiros do tipo R1-14.9-28 e em pneus dianteiros do tipo F1-7.50-16, utilizando ar para enchimento, para superfícies asfaltada, gramada e com terra preparada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para este trabalho, foi desenvolvido um modelo matemático implementado através de um programa computacional em linguagem Visual Basic. Assim, simulou-se a perda da estabilidade de tratores 4x2, sob condições estática e dinâmica. A fim de verificar os valores simulados pelo programa computacional, foi construída uma pista apropriada para ensaio de tombamento lateral de tratores. Na realização dos testes de tombamento, um trator foi equipado com estrutura de proteção contra tombamentos e com controle remoto, para substituir o operador em seu posto de trabalho.

3.1. Determinação do centro de gravidade do trator

Com objetivo de facilitar a redação do presente trabalho, foram utilizadas as seguintes siglas:

cg = centro de gravidade;

cgt = centro de gravidade da massa total do trator;

cgp = centro de gravidade parcial (massa total, subtraída a massa do eixo frontal); e

cgf = centro de gravidade da massa do eixo frontal.

Inicialmente, foram determinadas as posições do cgt, cgf e, em seguida, do cgp do trator. Entre as várias metodologias citadas por MIALHE (1980) e ABNT-NBR 12567, foi utilizada a metodologia da dupla pesagem, para

determinação do cgt, em que se pesa o eixo frontal, o eixo traseiro e o eixo frontal novamente, mas desta vez com o trator inclinado. Na determinação do cgf, usou-se o método de levantamento por dois pontos (Figura 4). O cgp foi determinado subtraindo-se do cgt o cgf, em um sistema de coordenadas X, Y e Z (Figura 2).

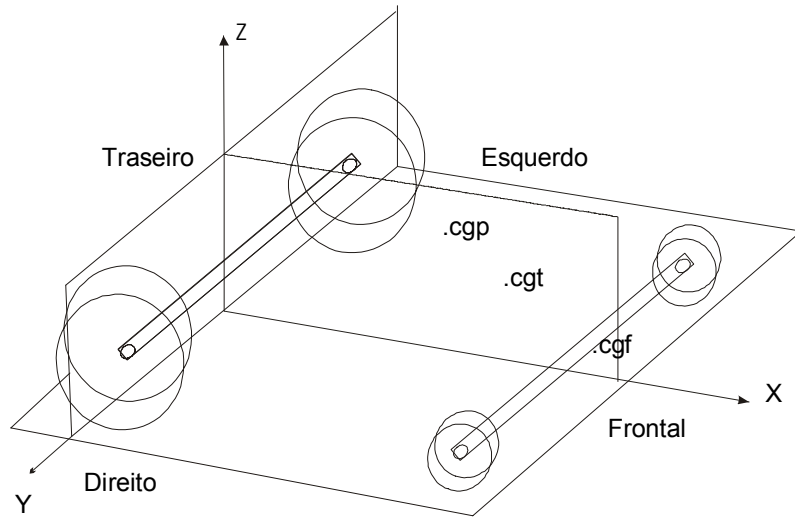


Figura 2 - Sistema de coordenadas para localização do centro de gravidade.

A seguir encontram-se as equações para determinar a localização do cgt:

$$X_{cgt} = \frac{X_L W_f}{m_{tf} g} \quad \text{eq.(9)}$$

$$Z_{cgt} = \frac{1}{\tan \beta} \left(X_{cgt} - \frac{W_{f\beta} X_{L\beta}}{m_{tf} g \cos \beta} \right) + R_t \quad \text{eq.(10)}$$

$$Y_{cgt} = \frac{W_d B_t}{m_{tf} g} - \frac{B_t}{2} \quad \text{eq.(11)}$$

em que

B_t = bitola traseira (m);

g = aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$);

W_f = reação do eixo frontal com o trator no plano (N);
 $W_{f\beta}$ = reação do eixo frontal com o trator inclinado (N);
 m_{tf} = massa total do trator (kg);
 X_L = distância entre eixos (m);
 $X_{L\beta}$ = projeção da distância entre eixos no piso com o trator inclinado (m);
 W_d = reação do lado direito do trator (N);
 R_t = raio do rodado traseiro (m); e
 β = ângulo de inclinação longitudinal do trator com a pista, utilizado para determinar a localização da coordenada Z do cgt (graus).

A localização do cgf foi feita após determinação da localização do cgt, retirando-se o pino do mancal localizado no eixo frontal e, com isso, separando-se o eixo frontal (Figura 3). Posteriormente, foram feitas a pesagem e o levantamento por dois pontos (Figura 4), determinando-se X_{cgf} , Z_{cgf} e Y_{cgf} , em relação ao sistema de coordenadas X,Y,Z.



Figura 3 - Massa parcial do trator após retirada do eixo frontal.

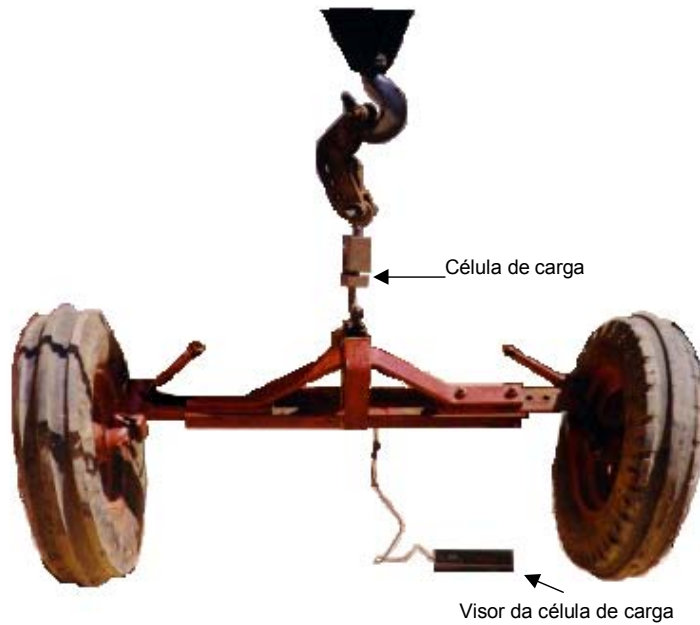


Figura 4 - Pesagem do eixo frontal através da célula de carga e levantamento por um dos dois pontos, para determinar a localização do cgf.

A localização do cgp foi determinada após localização do cgt e cgf, pelas seguintes equações:

$$X_{cgp} = \frac{X_{cgt}m_{tf} - X_{cgf}m_f}{m_p} \quad \text{eq. (12)}$$

$$Y_{cgp} = \frac{Y_{cgt}m_{tf} - Y_{cgf}m_f}{m_p} \quad \text{eq. (13)}$$

$$Z_{cgp} = \frac{Z_{cgt}m_{tf} - Z_{cgf}m_f}{m_p} \quad \text{eq. (14)}$$

em que

X_i = distância horizontal do plano de referência transversal traseiro ao centro de gravidade (m);

Z_i = distância vertical do plano de apoio ao centro de gravidade (m);

Y_i = distância horizontal do plano médio longitudinal ao centro de gravidade (m);

- i = localização do cgt, cgf e cgp;
- m_f = massa do eixo frontal desconectado (kg); e
- m_p = massa do trator, descontado o eixo frontal (kg).

Na determinação do cgt na direção dos eixos X e Z foi utilizada uma balança com capacidade de 15 toneladas, com precisão de mais ou menos 1 kg; para determinação do cgt na direção Y e para pesagem do eixo frontal, foi utilizada uma célula de carga com precisão de 0,1 kg.

3.2. Programa computacional

Foram feitas algumas considerações e simplificações no modelo, como:

- No cálculo da força centrífuga atuando no trator, a velocidade foi considerada a mesma em qualquer parte deste.
- Não foram considerados o efeito giroscópico dos componentes do motor e o deslocamento dos líquidos nos reservatórios do trator.
- Para cálculo das reações do solo-pneu, considerou-se que a superfície de apoio dos rodados teria a mesma inclinação.
- Os efeitos nos tombamentos causados por um giro rápido na direção e as irregularidades na pista, como ondulações, tocos, cupins, buracos de formigueiros etc., também não foram analisados.

A fim de analisar uma situação do trator trafegando em uma trajetória circular sobre uma pista com inclinação θ (Figura 5), foram considerados, no modelo: o deslocamento da carga sobre as rodas do lado inferior do trator; o efeito da força centrífuga agindo no cgp e cgf; a resistência ao rolamento; o ângulo de esterçamento δ dos pneus frontais; o ângulo φ em que se determina a posição do trator em relação ao seu deslocamento na pista inclinada; uma possível carga constante aplicada na barra de tração; e as deformações verticais e laterais dos pneus.

Para determinar as reações na interface do solo-pneu em condições dinâmicas, considerou-se que: o trator move-se com uma velocidade longitudinal constante; as reações do solo no trator estão atuando na linha

externa dos pneus; o ângulo de esterçamento δ (Figura 8) dos pneus frontais é utilizado para obter as componentes das forças nos eixos de referência X e Y, da resistência ao rolamento e das reações laterais atuando nos pneus frontais; o ângulo φ é igual a 90° (Figura 6), o que corresponde ao trator deslocar-se em curva de nível; e o trator 4x2 convencional foi dividido em duas massas, uma parcial (massa total do trator, subtraída a massa do eixo frontal), e a outra do eixo frontal (massa somente do eixo e rodados frontais).

O ângulo de posicionamento (φ) utilizado nos testes experimentais foi de 90° . Na Figura 6 são mostrados alguns ângulos φ em situações diferentes de posicionamento em uma pista inclinada, que o modelo é capaz de simular, podendo variar de 0° a 180° , no qual não foi verificado experimentalmente, neste trabalho, todos esses ângulos, pois espera-se que o trator movimentando-se na posição $\varphi = 90^\circ$ seja a posição próxima à de menor estabilidade para tombamentos laterais. A força na barra de tração foi considerada, no modelo, agindo no plano vertical, que passa pelo eixo longitudinal do trator; apesar de modelada, não foi verificada experimentalmente neste trabalho a ação desta força.

3.2.1. Cálculo das reações verticais e laterais nos pneus

Para determinar as reações nos pneus, realizaram-se os balanços e momentos, em relação aos eixos X, Y e Z, na massa parcial e no eixo frontal (Figuras 7 e 8). A estrutura parcial do trator 4x2 foi considerada apoiada por três pontos: nos dois rodados traseiros e no mancal do eixo frontal. O eixo frontal foi considerado também apoiado em três pontos, ou seja, nos dois rodados frontais e no mancal.



Figura 5 - Trator observado de frente, fazendo operação de curva em pista inclinada, em curva de nível, a uma velocidade constante, ângulo $\varphi = 90^\circ$.

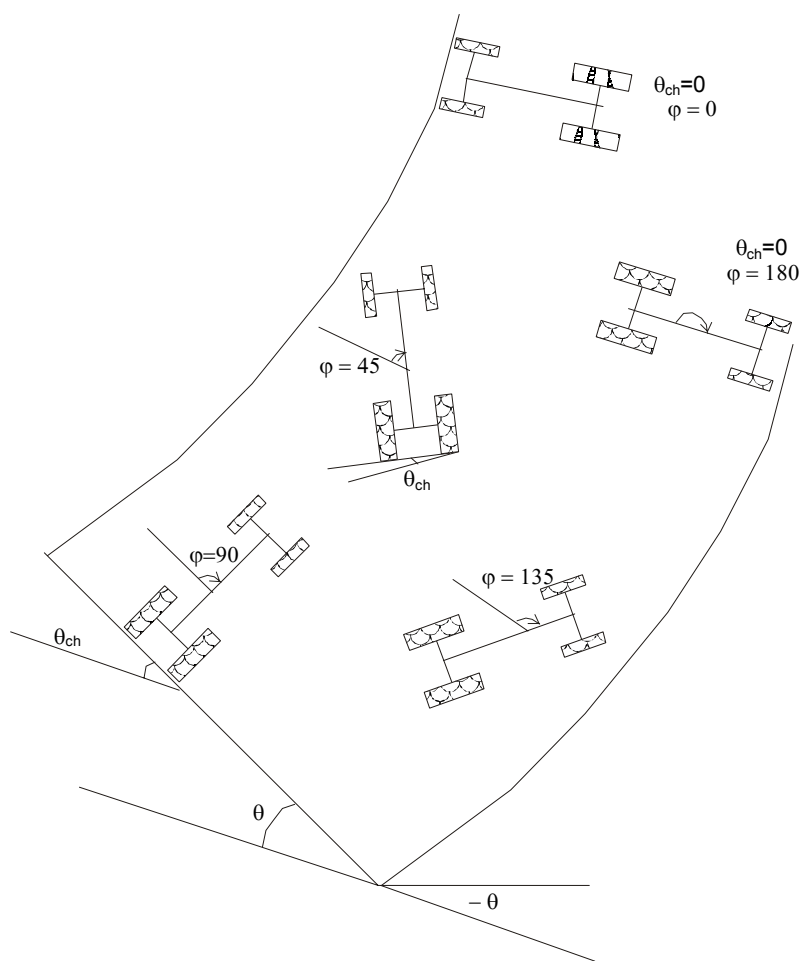


Figura 6 - Esquema de algumas orientações do trator operando em uma pista inclinada. O ângulo θ corresponde à inclinação da pista. O ângulo φ corresponde à posição do trator em relação ao deslocamento na pista. O ângulo θ_{ch} corresponde à inclinação lateral (transversal) do chassi do trator.

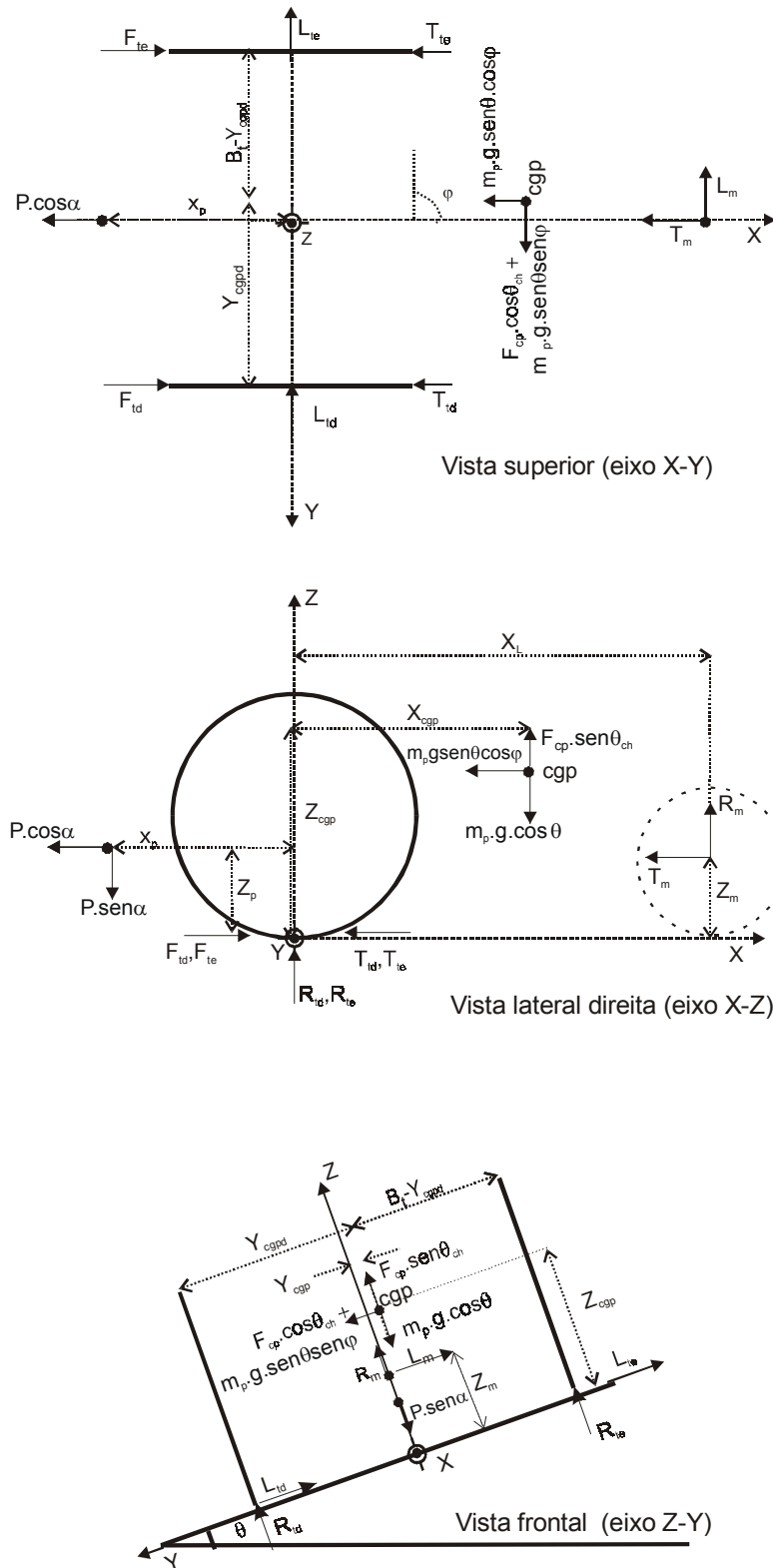


Figura 7 - Diagrama de corpo livre da massa parcial do trator, com vistas superior, lateral direita e frontal.

Fazendo o somatório do momento em torno do eixo Z (ΣM_Z), na massa parcial (Figura 7), através da equação (15), e considerando que o diferencial faz com que as forças de tração e resistência ao rolamento das rodas traseiras do lado direito e do lado esquerdo sejam iguais, tem-se a reação lateral no mancal, dada por L_m :

$$L_m = \frac{X_{cgp}}{X_L} (m_p g \sin \theta \sin \varphi + F_{cp} \cos \theta_{ch}) - \frac{(Y_{cgp} - B_t / 2) m_p g \sin \theta \cos \varphi}{X_L} \quad \text{eq.(15)}$$

sendo F_{cp} a força centrífuga atuante na massa parcial calculada pela equação:

$$F_{cp} = \frac{m_p V^2}{r} \quad \text{eq.(16)}$$

em que

m_p = massa parcial do trator (kg);

V = velocidade de deslocamento do trator ($m.s^{-1}$); e

r = raio de curva do trator em relação ao eixo traseiro (m).

O valor do ângulo lateral do chassi (θ_{ch}) em função da posição φ (Figura 6) do trator, em uma pista de inclinação constante θ , pode ser calculado utilizando-se da trigonometria esférica, segundo GREEN (1985), pela seguinte relação:

$$\theta_{ch} = \arcsen(\sen \theta \sen \varphi) \quad \text{eq.(17)}$$

em que

θ_{ch} = ângulo de inclinação lateral do chassi, graus;

θ = ângulo de inclinação da pista, graus; e

φ = ângulo de posição do trator em relação ao deslocamento na pista, graus.

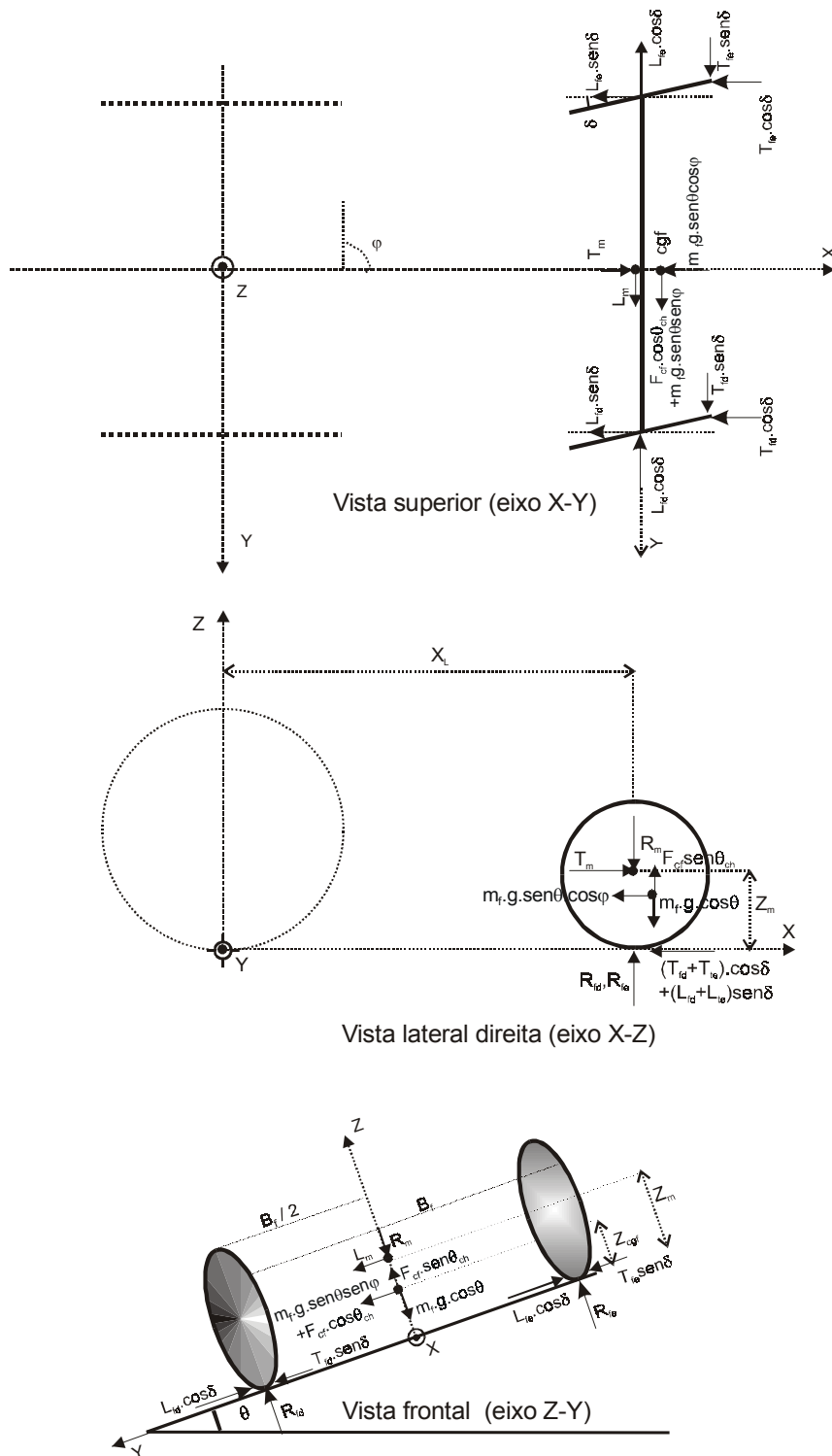


Figura 8 - Diagrama de corpo livre do eixo frontal, com vistas superior, lateral direita e frontal.

Pode-se obter um sistema de duas equações e duas incógnitas para determinar o valor de R_m e T_m no mancal, através das equações do ΣM_Y na massa parcial (Figura 7), e o ΣF_X , no eixo frontal (Figura 8):

$$X_L(R_m) + Z_c(T_m) = -m_p g \sin \theta \cos \varphi Z_{cgp} + m_p g \cos \theta X_{cgp} - F_{cp} \sin \theta_{ch} X_{cgp} - P \cos \alpha Z_p - P \sin \alpha X_p \quad \text{eq.(18)}$$

$$T_m = (T_{fe} + T_{fd}) \cdot \cos \delta + m_f g \sin \theta \cos \varphi + (L_{fd} + L_{fe}) \sin \delta \quad \text{eq.(19)}$$

em que

T_m = reação longitudinal no mancal do eixo frontal (N); e

R_m = reação vertical no mancal do eixo frontal (N).

Segundo CHUDAKOV(1977), o ângulo de esterçamento δ dos pneus de direção pode ser calculado pela relação geométrica:

$$\delta = \frac{X_L 180}{r\pi}, \text{ graus} \quad \text{eq.(20)}$$

Podem-se determinar o ΣF_Z , ΣF_Y no eixo frontal (Figura 8) e a resistência ao rolamento dos rodados frontais pela equação da ASAE D497 (ASAE, 1990) e, depois, substituir na equação (19), para-se obter uma equação em função de T_c e R_c .

$$R_{fd} + R_{fe} = m_f g \cos \theta + R_m - F_{cf} \sin \theta_{ch} \quad \text{eq.(21)}$$

$$L_{fd} + L_{fe} = \frac{F_{cf} \cos \theta_{ch}}{\cos \delta} + \frac{m_f g \sin \theta \sin \varphi}{\cos \delta} + \frac{L_m}{\cos \delta} + (T_{fd} + T_{fe}) \tan \delta \quad \text{eq.(22)}$$

$$T_{fd} + T_{fe} = q_f (R_{fd} + R_{fe}) \quad \text{eq.(23)}$$

em que F_{cf} é a força centrífuga atuando no eixo frontal e q_f é o termo que determina a resistência ao rolamento dos rodados frontais, em relação às cargas verticais, conforme as seguintes equações:

$$F_{cf} = \frac{m_f V^2}{r} \quad \text{eq.(24)}$$

$$q_f = \frac{1,2}{cn} + 0,04 \quad \text{eq.(25)}$$

$$cn = \frac{Clbd}{R_{fk}},$$

em que

cn = adimensional do pneu;

m_f = massa do eixo frontal excluída a massa parcial (kg);

Cl = índice de cone (Pa);

b = largura do pneu (m);

d = diâmetro externo do pneu indeformado (m); e

R_{fk} = reação vertical no pneu frontal (lado, k) (N).

Substituindo (21), (22) e (23) em (19), obtém-se a equação (26), em função das variáveis T_m e R_m :

$$\begin{aligned} & (q_f \cos \delta + q_f \tan \delta \sin \delta)(R_m) - (T_m) = \\ & -q_f m_f g \cos \theta \cos \delta + q_f F_{cf} \sin \theta_{ch} \cos \delta - F_{cf} \cos \theta_{ch} \tan \delta \\ & - m_f g \sin \theta \sin \varphi \tan \delta - L_m \tan \delta - m_f g \sin \theta \cos \varphi \\ & + q_f F_{cf} \sin \theta_{ch} \tan \delta \sin \delta - q_f m_f g \cos \theta \tan \delta \sin \delta \end{aligned} \quad \text{eq.(26)}$$

Resolvendo o sistema de equações (18) e (26), obtém-se o valor R_m e T_m .

Para determinar o valor da R_{td} e R_{te} , monta-se um segundo sistema de duas equações e duas incógnitas, fazendo $\sum M_x$ e o $\sum F_z$ na massa parcial (Figura 7):

$$\begin{aligned} & -\frac{B_t}{2}(R_{td}) + \frac{B_t}{2}(R_{te}) = Z_m L_m - m_p g \sin \theta \sin \varphi Z_{cgp} - F_{cp} \cos \theta_{ch} Z_{cgp} \\ & + m_p g \cos \theta (Y_{cgp} - B_t/2) - F_{cp} \sin \theta (Y_{cgp} - B_t/2) \end{aligned} \quad \text{eq.(27)}$$

$$(R_{td}) + (R_{te}) = -R_m + m_p g \cos \theta - F_{cp} \sin \theta + P \sin \alpha \quad \text{eq.(28)}$$

Resolvendo o sistema anterior, obtém-se o valor da R_{td} e R_{te} .

Segundo LILJEDAHN et al. (1989), o coeficiente que determina a razão entre a força lateral e a força vertical dos pneus traseiros é igual, conforme a equação:

$$\frac{L_{td}}{R_{td}} = \frac{L_{te}}{R_{te}} = K_t \quad \text{eq.(29)}$$

Rearranjando a equação (29), pode-se chegar a uma relação correspondente:

$$R_{td} L_{te} = R_{te} L_{td}$$

$$R_{td} L_{te} + R_{td} L_{td} = R_{te} L_{td} + R_{td} L_{td}$$

$$R_{td} (L_{te} + L_{td}) = L_{td} (R_{te} + R_{td})$$

$$\frac{L_{te} + L_{td}}{R_{te} + R_{td}} = \frac{L_{td}}{R_{td}}$$

Assim, obtém-se a equação 30:

$$\frac{L_{td} + L_{te}}{R_{td} + R_{te}} = K_t \quad \text{eq.(30)}$$

Fazendo o $\sum F_Y = 0$ na massa parcial (Figura 7), obtém-se a soma das reações laterais nos pneus traseiros (31):

$$L_{td} + L_{te} = -L_m + m_p g \sin \theta \sin \varphi + F_{cp} \cos \theta \quad \text{eq.(31)}$$

Usando-se a equação 31, é possível determinar a soma das reações laterais nos pneus traseiros; pela equação 28, calcula-se a soma das reações verticais nos pneus traseiros. Substituindo esses valores na equação 30,

determina-se o valor da constante K_t . As reações laterais L_{td} e L_{te} são determinadas pelas equações 32 e 33:

$$L_{td} = K_t R_{td} \quad \text{eq.(32)}$$

$$L_{te} = K_t R_{te} \quad \text{eq.(33)}$$

A reação vertical nos pneus frontais pode ser obtida pelos balanços do momento em relação ao eixo X (ΣM_x) e das forças em relação ao eixo Z (ΣF_z) no eixo frontal (Figura 8). Realizando esses balanços, obtém-se o terceiro sistema de duas equações e duas incógnitas (R_{fd} e R_{fe}):

$$\frac{B_f}{2} (R_{fd}) - \frac{B_f}{2} (R_{fe}) = L_m Z_m + m_f g \sin \theta \sin \varphi Z_{cgf} + F_{cf} \cos \theta_{ch} Z_{cgf} \quad \text{eq.(34)}$$

$$(R_{fd}) + (R_{fe}) = m_f g \cos \theta + R_m - F_{cf} \sin \theta_{ch} \quad \text{eq.(35)}$$

Utilizando a mesma consideração feita na equação (30) para os pneus frontais, tem-se

$$\frac{L_{fd} + L_{fe}}{R_{fd} + R_{fe}} = K_f \quad \text{eq.(36)}$$

A soma das reações L_{fd} e L_{fe} foi obtida pela equação (22), e, com o ΣF_y no eixo frontal, tem-se a soma de R_{fd} e R_{fe} pela equação (35). Com isso, já se tem o valor de K_f :

$$L_{fd} = K_f R_{fd} \quad \text{eq.(37)}$$

$$L_{fe} = K_f R_{fe} \quad \text{eq.(38)}$$

Assim, obtiveram-se todas as reações verticais e laterais atuando nos pneus, em função das variáveis que determinam a operação e situação do trator em uma pista inclinada.

3.2.2. Cálculo das deformações dos pneus

O desequilíbrio das reações nos pneus do trator (mais de um lado do que o outro), devido ao fato de este trafegar em pista inclinada ou à ação da força centrífuga, faz com que as deformações nos pneus sejam diferentes, pois estas dependem das reações aplicadas neste, o que resulta em aumento da inclinação lateral do chassi, em relação à pista, diminuindo a estabilidade do trator.

De posse das reações do solo-pneu, calculadas em 3.2.1., e das constantes de rigidez, por INOUE (1997), obtidas experimentalmente para pneus traseiros tipo R1 - diagonal, seis lonas e medidas 14.9 – 28, com altura de garras de 0,0; 12,0; e 29,0 mm, podem-se determinar as deformações dos pneus. Para a equação que determina a constante de rigidez dos pneus traseiros, foi necessário fazer um ajuste, multiplicando o valor obtido por um fator igual a 0,33. Este ajuste foi feito com a intenção de reduzir a constante de rigidez em um terço, pois foram tomadas algumas medidas de deformações verticais na condição do experimento; comparadas com os valores calculados por INOUE (1997), verificaram-se deformações três vezes maior (Apêndice D). Essas diferenças podem ser explicadas pelo fato de terem sido utilizados pneus de marcas diferentes (o aro do pneu utilizado no experimento foi de 24 polegadas); elas podem ser também atribuídas ao fato de as deformações terem sido obtidas experimentalmente, por meio de aplicações somente de cargas verticais nos pneus, apoiados em uma pista plana, e medindo-se as deformações em relação ao aro externo do pneu. Para a condição do experimento, acrescentam-se, na condição anterior, reações laterais de intensidade relativamente alta, ocorridas na iminência do tombamento, que resultam em deformações laterais simultaneamente, podendo afetar as deformações verticais, além do fato de que as deformações são medidas do lado externo nos pneus, onde estão concentradas mais intensamente as reações e deformações laterais. Os pneus frontais foram do tipo F1 - diagonal, oito lonas e medidas 7.50 – 16, com alturas de friso de 0,0; 15,0; e 23,0 mm, utilizando ar para seu enchimento, em pista asfaltada. As constantes de rigidez, propostas pelo citado autor, já incluído na $K_{v_{tk}}$ o ajuste, são calculadas pelas seguintes equações:

$$K_{vfk} = 70,82 + 0,613P_{fk} \quad \text{eq.(39)}$$

$$K_{vtk} = (105 + 1,6454P_{tk})0,33 \quad \text{eq.(40)}$$

$$K_{lfk} = 43 + 4,29111G_{fk} + 0,5667.P_{fk} - 0,2449G_{fk}^2 \quad \text{eq.(41)}$$

$$K_{ltk} = 146 - 0,0056R_{tk} + 1,8432P_{tk} - 0,0346G_{tk}P_{tk} \quad \text{eq.(42)}$$

em que

K_{vjk} = constante de rigidez vertical, posição j , lado k (kN.m^{-1});

K_{ljk} = constante de rigidez lateral, posição j , lado k (kN.m^{-1});

G_{jk} = altura da garra do pneu traseiro, posição j , lado k (mm);

P_{jk} = pressão de enchimento dos pneus, posição j , lado k (kPa);

j = posição (f = frontal; t = traseiro); e

k = lado; (d = direito; e = esquerdo).

Ao determinar as constantes de rigidez vertical e lateral dos pneus, é possível obter as deformações verticais e laterais destes, devido às reações normais e laterais na interface solo-pneu, com as seguintes equações:

$$D_{vjk} = \frac{R_{jk}}{K_{vjk}} \quad \text{eq.(43)}$$

$$D_{ljk} = \frac{L_{jk}}{K_{ljk}} \quad \text{eq.(44)}$$

em que

D_{vjk} = deformação vertical do pneu em posição j , lado k (m);

D_{ljk} = deformação lateral do pneu em posição j , lado k (m);

R_{jk} = reação vertical do pneu em posição j , lado k (kN); e

L_{jk} = reação lateral do pneu em posição j , lado k (kN).

3.2.3. Cálculo da inclinação lateral do chassi pelo efeito das deformações dos pneus

O efeito das deformações dos pneus na inclinação lateral do trator é determinado subtraindo-se as deformações de um lado pelo outro em um mesmo eixo do trator, pois assim se obtém o valor total deformado. Este valor relaciona-se com a distância entre as extremidades dos pneus em um mesmo eixo; dessa forma, tem-se a inclinação aumentada do trator pelo resultado das deformações. Por exemplo, quando um trator estiver em pista plana, trafegando em linha reta, e o cg na direção transversal estiver localizado na linha central, as reações verticais nos pneus dos lados direito e esquerdo serão iguais; conseqüentemente, as deformações dos pneus de um lado também serão iguais, não afetando a inclinação lateral do trator. Em operações com o trator trafegando em uma pista inclinada ou fazendo curva, as reações nos pneus são maiores de um lado do que do outro, resultando em deformações diferentes mais de um lado do que de outro. Como no modelo, no primeiro estágio do tombamento considera-se a massa parcial do trator apoiado em três pontos: nos dois pneus traseiros e no mancal no eixo frontal. Em razão disso, foram consideradas somente as deformações dos pneus traseiros na estabilidade. Com as equações a seguir, é possível relacionar o efeito das deformações nos pneus traseiros na inclinação do chassi e, conseqüentemente, na estabilidade lateral do trator:

$$D_{vt} = D_{vtd} - D_{vte} \quad \text{eq.(45)}$$

$$D_{lt} = D_{ltd} - D_{lte} \quad \text{eq.(46)}$$

em que

D_{vt} = deformação vertical resultante dos pneus traseiros (m); e

D_{lt} = deformação lateral resultante dos pneus traseiros (m).

O valor somado ao ângulo de inclinação lateral do chassi, devido ao resultado das deformações dos pneus, pode ser calculado da seguinte forma:

$$\theta_{dl} = \arcsen \frac{D_{vt}}{B_t - D_{lt}} \quad \text{eq.(47)}$$

em que

θ_{dl} = ângulo de inclinação lateral devido às deformações dos pneus (graus); e

$(B_t - D_{lt})$ = bitola efetiva do trator após deformações laterais (m).

3.2.4. Limite de estabilidade por tombamento lateral, incluindo deformações dos pneus

O programa computacional calcula inicialmente as reações verticais e laterais, sem considerar deformações dos pneus. A instabilidade lateral ocorrerá se a reação vertical em um dos pneus traseiros for menor ou igual a zero, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 9.

A transferência de peso de um lado para o outro do trator ao trafegar por uma pista inclinada, ou pela ação da força centrífuga, caso o trator esteja fazendo curva, faz com que as reações no solo-pneu ocorram mais de um lado do trator do que do outro. Estas deformações nos pneus implicam aumento da inclinação lateral do chassi do trator, calculado pela equação 47. Esta é somada na inclinação do chassi do trator calculado inicialmente, sem considerar as deformações dos pneus; este aumento na inclinação do chassi acarretará diminuição da inclinação-limite da pista para tombamento lateral do trator, pois este poderá estar mais inclinado do que a pista em que estará apoiado. Assim, por inclinar-se mais o chassi em relação ao plano de apoio (pista), o cálculo das reações nos pneus também é afetado pela modificação da inclinação do chassi. Como as deformações nos pneus fazem com que a instabilidade ocorra antes, conseqüentemente, este efeito diminui a inclinação-limite da pista. Como exemplo, utilizando um trator que se desloca numa pista em curva de nível ($\varphi=90^\circ$), verificou-se que o ângulo de inclinação da pista onde ocorreu a instabilidade foi de 37° ($\theta_L = 37^\circ$). As deformações dos pneus fizeram com que o chassi do trator se inclinasse mais lateralmente, por exemplo em mais 3° ; assim, o trator perdeu a estabilidade em uma pista de 37° e com inclinação do chassi já em 40° . Caso não ocorressem deformações nos pneus do trator, este poderia trafegar em uma pista inclinada em 40° .

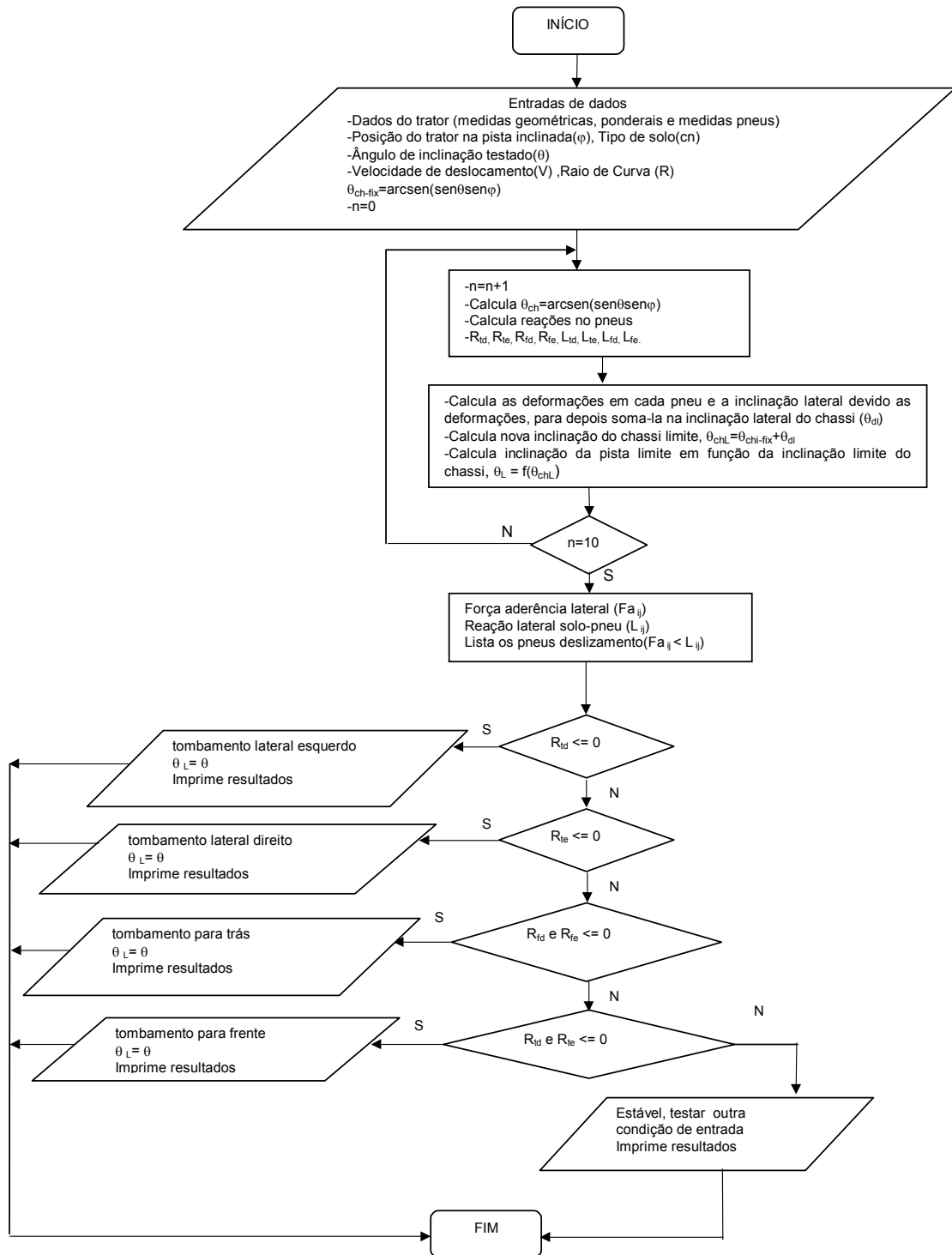


Figura 9 - Fluxograma.

Quando um trator não estiver se deslocando em curva de nível na pista, a relação do ângulo-limite da pista já não será mais uma relação direta com o ângulo-limite do chassi, como no exemplo anterior. Utiliza-se, então, a trigonometria esférica para determinar a relação da inclinação-limite da pista, em relação à inclinação lateral-limite do chassi, incluindo a posição φ do trator na pista.

O procedimento e as equações para determinar o limite de inclinação da pista em operações diversas de posicionamento, em uma pista inclinada, ocorrerão como descrito a seguir.

Inicialmente, obtêm-se as reações nos pneus sem considerar as deformações destes. Com essas reações iniciais, calculam-se as deformações dos pneus e o efeito delas na inclinação lateral do chassi; assim, o programa faz n iterações igual a 10 (Figura 9), e nele se verificou que este valor não mais alterava significativamente a inclinação de uma iteração para outra. Foram calculadas novamente as reações nos pneus, só que somando-se na inclinação do chassi (equação 48) a inclinação devido às deformações dos pneus. A inclinação da pista correspondente à inclinação do chassi, aumentada pelas deformações dos pneus, é determinada utilizando-se a trigonometria esférica (equação 49):

$$\theta_{chL} = \theta_{ch} + \theta_{di} \quad \text{eq.(48)}$$

em que

θ_{ch} = ângulo de inclinação do chassi, sem deformações dos pneus, (graus); e

θ_{chL} = ângulo-limite de inclinação do chassi após deformações dos pneus (graus).

O ângulo-limite de inclinação da pista que corresponde à inclinação-limite do chassi é utilizado em cada iteração para recalculas as reações nos solo-pneus e pode ser calculado utilizando-se, novamente, a trigonometria esférica, dada por

$$\theta_L = \arcsen\left(\frac{\text{sen}(\theta_{chL})}{\text{sen}(\varphi)}\right) \quad \text{eq.(49)}$$

em que

θ_L = ângulo-limite de inclinação da pista (graus).

Quando o trator estiver posicionado em um ângulo φ igual a 0° ou 180° , a equação 49 torna-se indeterminada, pois o seno destes ângulos é zero. No entanto, a inclinação lateral do chassi θ_{ch} , devido às deformações dos pneus quando o trator estiver posicionado nestes ângulos, é relativamente baixa, uma vez que não há transferência de peso lateralmente. Portanto, pode-se desconsiderar o efeito da inclinação lateral devido às deformações dos pneus; então $\theta_{chL} = \theta_{ch}$. Substituindo na equação 49, $\text{sen} \theta_{ch} = \text{sen} \theta \text{sen} \varphi$ (equação 17), e cortando $\text{sen} \varphi$, a equação 49 tende para θ , $\theta_L = \theta$. Com isso, o limite de estabilidade é a inclinação da pista sem descontar o efeito das deformações dos pneus, e o ângulo-limite calculado nessas posições é chamado limite de estabilidade longitudinal.

O limite de estabilidade lateral, no primeiro estágio do tombamento, é obtido em função das medidas geométricas e ponderais do trator e dos pneus, na situação de operação, ou seja, fazendo-se uma curva r , com uma velocidade V , em uma pista de ângulo de inclinação θ , a uma posição φ na pista inclinada. O trator estará estável, quanto ao tombamento lateral, se a reação vertical nos pneus traseiros for maior que zero e instável se qualquer um dos pneus traseiros estiver com reação vertical menor ou igual a zero.

Após perder a estabilidade, o trator começa a girar sobre um eixo imaginário entre o mancal localizado no eixo frontal e o apoio de uma das rodas traseiras, chamado de primeiro estágio do tombamento lateral. Nesta fase o trator já perdeu a estabilidade, mas o giro do tombamento fica limitado pelo ângulo de liberdade entre a massa parcial e o eixo frontal (Figura 10) e poderá ser interrompido quando o corpo parcial do trator se chocar com o eixo frontal. O segundo estágio do tombamento inicia-se quando o eixo frontal não

consegue interromper o giro inicial, e este ocorre em torno do eixo entre os pontos de apoio dos pneus laterais do lado do tombamento.

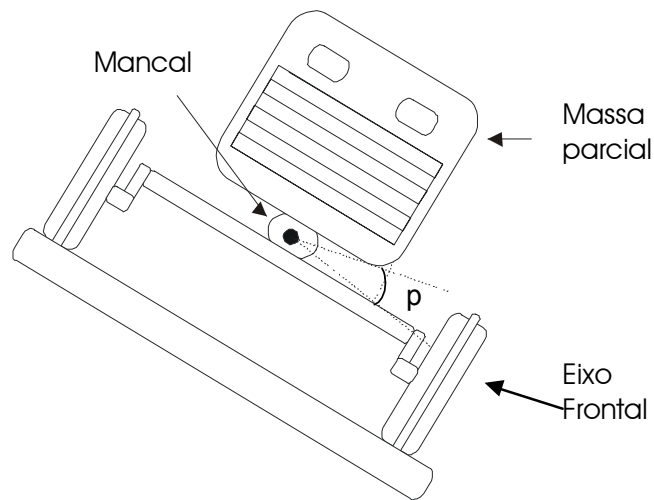


Figura 10 -Vista frontal da ligação pelo mancal da massa parcial com o eixo frontal e o ângulo de liberdade (p) entre eles.

Uma das formas de verificar se a massa do eixo frontal é suficiente para interromper o tombamento da massa parcial, ou seja, se o primeiro estágio de tombamento será seguido do segundo, é considerar a conservação de energia na colisão da massa parcial com o eixo frontal. Calcula-se a energia cinética adquirida pelo centro de gravidade da massa parcial ao se girar em torno do eixo compreendido entre o mancal e a roda traseira. Comparando, o valor da energia cinética adquirida ao girar a massa parcial é maior que a energia necessária para continuar a girar o trator como um todo (massa do eixo frontal e parcial) (DIAS et al., 1993a). Outra forma seria por conservação de momento, determinando-se o impulso durante a colisão. Neste caso, o segundo estágio do tombamento ocorrerá se o impulso resultante da colisão da massa parcial com o eixo frontal no primeiro estágio for suficiente para proporcionar uma energia cinética que seja maior que a energia potencial a ser superada no segundo estágio do tombamento.

3.2.5. Tombamento longitudinal

O modelo permite também obter o limite de estabilidade longitudinal para o trator operando em declive (descendo) e aclave (subindo). Para obter o limite de estabilidade em aclave, tombamento para trás, o ângulo φ (Figuras 6 e 7), relativo ao eixo longitudinal, é igual a zero grau. O ângulo-limite de estabilidade é obtido quando a reação nos pneus frontais for menor ou igual a zero. Para o limite de estabilidade em declive, tombamento para frente, o ângulo φ relativo ao eixo longitudinal é de 180° ; neste caso, o ângulo-limite de inclinação da pista ocorre quando a reação nos pneus traseiros estiver menor ou igual a zero. Mesmo para uma situação de inclinação longitudinal do trator em declive, com a inclinação lateral do chassi nula, pode ocorrer tombamento lateral, se o centro de gravidade estiver deslocado do eixo central do trator. Surgirão momentos laterais que podem provocar o tombamento lateral, em vez do tombamento para frente.

3.3. Solução do modelo para perda da estabilidade por deslizamento

A ocorrência de tombamento, ou não, dependerá se antes ocorrer deslizamento lateral dos pneus. Este deslizamento pode ocorrer devido à interação de vários fatores, como tipo de pneu, carga sobre pneu, inclinação da pista, tipo de piso e altura de garras dos pneus. Portanto, para melhor análise, a força de aderência lateral do piso-pneu será determinada. Segundo INOUE (1997), as equações para predizer essas forças para pneus traseiros do tipo R1-14.9-28 e pneus dianteiros do tipo F1-7.50-16, utilizando ar para enchimento, em pista asfaltada, são:

$$F_{a_{fk}} = 881 + 158G_{fk} + 0,00003R_{fk}^2 - 3,33G_{fk}^2 + 0,0182P_{fk}^2 - 0,4908G_{fk}P_{fk} \quad \text{eq.(50)}$$

$$F_{a_{tk}} = 1444 + 0,7274R_{tk} - 0,0023P_{tk}R_{tk} \quad \text{eq.(51)}$$

em que

$F_{a_{jk}}$ = força de aderência lateral dos pneus, posição j , lado κ (N);

G_{fk} = altura das garras dos pneus frontais, lado κ (mm); e

P_{fk} = pressão de enchimento dos pneus, posição j , lado κ (kPa);

A força de aderência lateral, para que não ocorra o deslizamento, deverá ser maior que a reação lateral no pneu do lado do tombamento. A análise sobre deslizamento, quando um trator estiver tombando para a direita por exemplo, pode ser feita somente nos pneus do lado direito do trator, em razão de este, mesmo sem aderência nos pneus do lado esquerdo, ainda se encontrar estável. Outra operação, acrescentando-se à situação anterior, é quando as rodas de um dos lados do trator estiverem apoiadas em uma pista plana, como em um sulco, fazendo curva. Como no exemplo do experimento, o trator estava com as rodas do lado direito apoiadas em pista plana, fazendo curvas para esquerda e trafegando em uma pista inclinada. As reações verticais dos pneus, para cálculo da força de aderência lateral, podem ser calculadas de acordo com a Figura 11.

$$R_{tdn} = R_{td} \cos(\theta_{ch}) + L_{td} \sin(\theta_{ch}) \quad \text{eq.(52)}$$

em que

R_{tdn} = reação vertical na pista plana do lado direito (N); e

θ_{ch} = inclinação do chassi do trator (graus).

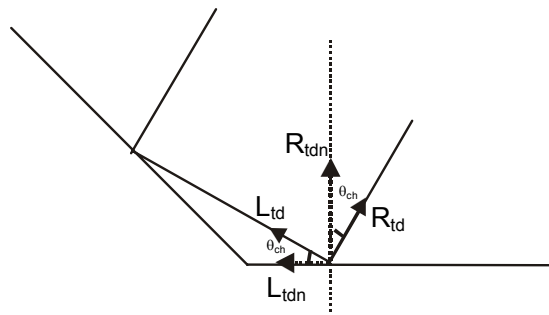


Figura 11 - Reações verticais e laterais dos rodados do lado direito apoiados em uma pista plana e, os do outro, em uma pista inclinada.

Como a força de aderência lateral ocorre em função da reação vertical, substituindo a equação (52) em (50) e (51), obtém-se:

$$Fa_{fdn} = 881 + 158G_{fd} + 0,00003R_{fdn}^2 - 3,33G_{fd}^2 + 0,0182P_{fd}^2 - 0,4908G_{fd}P_{fd} \quad \text{eq.(53)}$$

$$Fa_{tdn} = 1444 + 0,7274R_{tdn} - 0,0023P_{td}R_{tdn} \quad \text{eq.(54)}$$

em que

Fa_{fdn} = força de aderência do pneu frontal direito, sobre a pista plana, em situação do trator inclinado (N); e

Fa_{tdn} = força de aderência do pneu traseiro direito, sobre a pista plana, em situação do trator inclinado (N).

Para comparar com a Fa_{fdn} e Fa_{tdn} , foi calculada a reação lateral dos pneus na mesma situação da Figura 11, dada por L_{fdn} e L_{tdn} .

$$L_{fdn} = L_{fd} \cos(\theta_{ch}) - R_{fd} \sin(\theta_{ch}) \quad \text{eq.(55)}$$

$$L_{tdn} = L_{td} \cos(\theta_{ch}) - R_{td} \sin(\theta_{ch}) \quad \text{eq.(56)}$$

em que

L_{fdn} = reação lateral do pneu frontal direito, sobre a pista plana, em situação do trator inclinado (N); e

L_{tdn} = reação lateral do pneu traseiro direito, sobre a pista plana, em situação do trator inclinado (N).

3.4. Procedimento experimental

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Mecanização Agrícola, situado no campus da Universidade Federal de Viçosa-MG.

Para realização dos testes de verificação do modelo matemático implementado em um programa computacional, foram feitas as etapas que seguem.

3.4.1. Construção de uma pista de concreto padronizada

A pista de testes foi construída com objetivo de simular diversos valores para raio de curva (r) e ângulos de inclinação (θ). O menor raio, estipulado em 3 metros, foi estabelecido por meio de consulta em catálogos de fabricantes de tratores, enquanto o maior raio foi estipulado em 10 metros, conforme recomendação de CATANEO (1988). O ângulo-limite lateral da pista foi fixado em 40° , conforme recomendações do mesmo autor.

A pista construída possibilita variar a inclinação de apoio do trator de 0 a 40° , dependendo da bitola e da posição transversal do trator a ser testado, Figura 12(b). O formato da pista no sentido do deslocamento foi em espiral logarítmica, Figura 12(a), em que se inicia com curvatura maior e, ao deslocar-se na espiral, diminui o raio de curva. A pista permite, dependendo de seu posicionamento transversal, variar o raio de curva, inicialmente em 8,01, até 2,31 m e, em relação à posição externa da pista, de 12,04 até 6,41 m. As linhas que delimitam a pista foram plotadas por pontos determinados pela equação espiral logarítmica de coordenadas polares (BATSCHELET, 1978), variando-se o termo independente, λ , de $\pi/4$ a 2π , de acordo com as equações a seguir:

$$C_{\text{int}} = 2(1,247)^\lambda \quad \text{eq.(57)}$$

$$C_{\text{m}} = 2(1,247)^\lambda + 1,57 \quad \text{eq.(58)}$$

$$C_{\text{ext}} = 2(1,247)^\lambda + 4,07 \quad \text{eq.(59)}$$

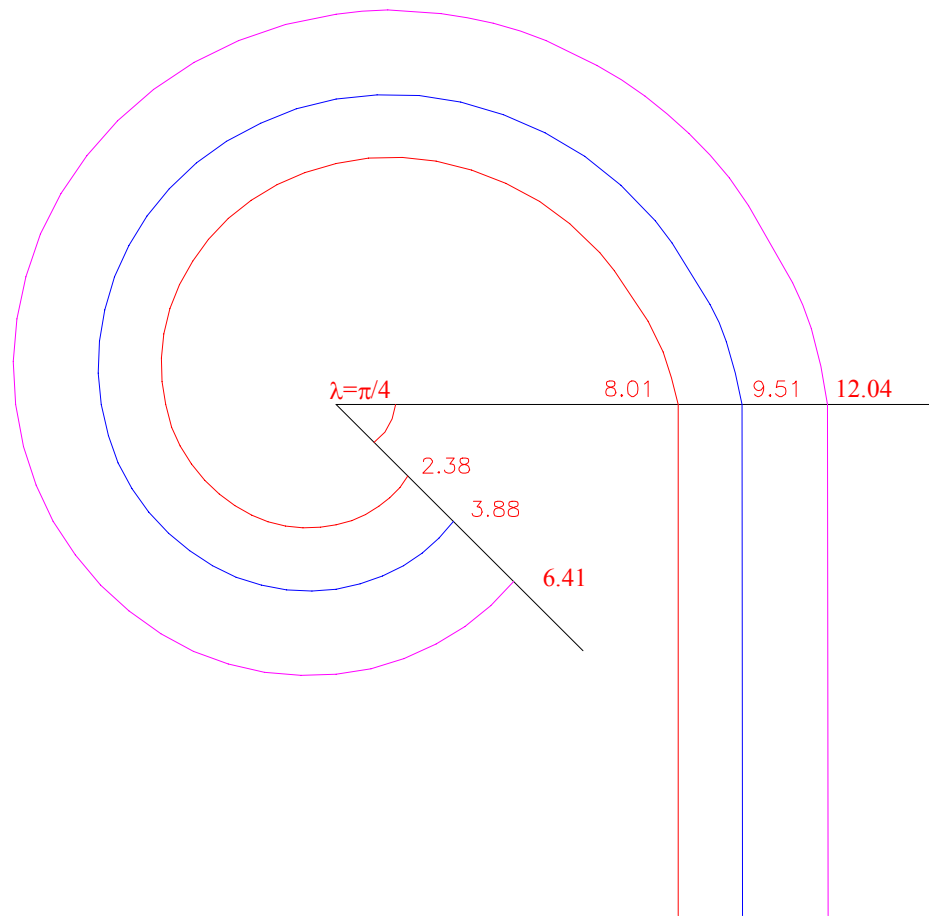
em que

λ = ângulo de posição do deslocamento do trator na pista de teste (rad);

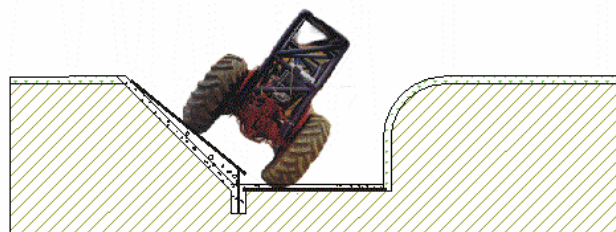
C_{int} = raio de curva no limite interno da pista inclinada, em função de λ (m);

C_{m} = raio de curva no limite externo da pista inclinada, em função de λ (m); e

C_{ext} = raio de curva no limite externo da pista plana, em função de λ (m).



a - vista superior



b - corte transversal

Figura 12 - Vista superior e corte transversal da pista de teste.

A pista fornece opções para se trabalhar com vários raios de curvas e várias inclinações. A superfície foi construída de concreto armado e revestida com massa, com um traço de três partes de areia peneirada e uma parte de cimento.

3.4.2. Estrutura de proteção

O trator foi equipado com estrutura de proteção contra tombamento, com a finalidade de protegê-lo durante os testes de verificação do modelo. A estrutura de proteção foi construída utilizando-se as normas de ensaio ABNT, NBR 10.000 e NBR10.001. Esta última norma fornece a energia do impacto nos ensaios de estrutura de proteção contra tombamento, em função da massa do trator. Para transformar a energia de impacto em força de impacto do bloco utilizado para ensaiar a estrutura, foram utilizadas as seguintes equações (FENSTER e UGURAL, 1987):

$$F_i = W_b \sqrt{\frac{v_i^2}{\delta_{st}g}} \quad \text{eq.(60)}$$

$$\delta_{st} = \frac{W_b L^3}{48EJ} \quad \text{eq.(61)}$$

$$v_i = \sqrt{2gh_{st}} \quad \text{eq.(62)}$$

em que

F_i = força de impacto (N);

W_b = carga estática do bloco (19640 N) NBR 10001 (N);

v_i = velocidade de impacto do bloco na peça ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

δ_{st} = deformação estática (flecha decorrente da carga estática na peça) (m);

E = módulo de elasticidade do material utilizado na estrutura ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$);

J = momento de inércia da peça utilizado na estrutura (m^4);

h_{st} = altura de levantamento do bloco em função do peso do trator (m); e

L = comprimento do menor vão da peça na estrutura (m).

A estrutura foi construída com tubos de aço, fixados em seis pontos do chassi do trator por parafusos e ligados entre si por encaixe do tipo boca de lobo, com soldas MIG e elétrica, formando uma estrutura tridimensional em forma de treliça. No dimensionamento, foi utilizado o programa computacional ANSYS, versão ED 5.3. Empregou-se a equação 60 para calcular a força de

impacto aplicada na estrutura, e os pontos de atuação dessas forças foram aplicados de acordo com a norma de EPCC (NBR 10001).

O tubo utilizado na construção da estrutura tem as seguintes medidas e propriedades, de acordo com ensaio de tração:

- diâmetro externo - 0,0762(m);
- espessura - 0,002 (m);
- módulo de elasticidade - 205800 (MPa);
- coeficiente de Poisson – 0,25; e
- limite de tensão elástico – 343 (MPa).

O tipo de elemento utilizado no programa ANSYS, para o dimensionamento, foi PIPE16. Trata-se de um elemento tubular unidimensional, sujeito a esforços de tração, compressão e flexão. Ele possui seis graus de liberdade e é delimitado por dois nós. O programa computacional fornece a tensão equivalente máxima principal em cada elemento.

No dimensionamento, as deformações do tubo permitidas foram somente as do tipo elástico. Inicialmente, simularam-se as tensões equivalentes máximas em uma estrutura-padrão com somente três arcos, fixados em seis pontos do chassi. Como as tensões ultrapassavam a tensão admissível do tipo elástico, foram acrescentados tubos, ligando-os entre os nós (Figura 13), com a finalidade de reforçar, formando treliças, até se encontrar um número de posições de ligação dos tubos, suficiente para que as tensões calculadas pela simulação, se mantivessem abaixo da tensão de limite elástico admissível ou igual a esta.

Para calcular as forças de impacto dos tombamentos, utilizou-se a equação (60), em que foram encontrados os seguintes valores:

força de impacto lateral, esquerda e direita = 127.660 (N);

força de impacto frontal = 78.560 (N); e

força de impacto traseiro = 58.920 (N).

No dimensionamento foram utilizadas as forças aplicadas na estrutura calculada anteriormente; no Apêndice C encontra-se a localização, na estrutura, dos nós nos quais foram aplicadas estas forças, mencionadas a seguir. No lado

esquerdo da estrutura, a força foi aplicada nos nós dos elementos de número 51, 52, 14 e 11, e, no lado direito, nos elementos 53, 54, 6 e 7.

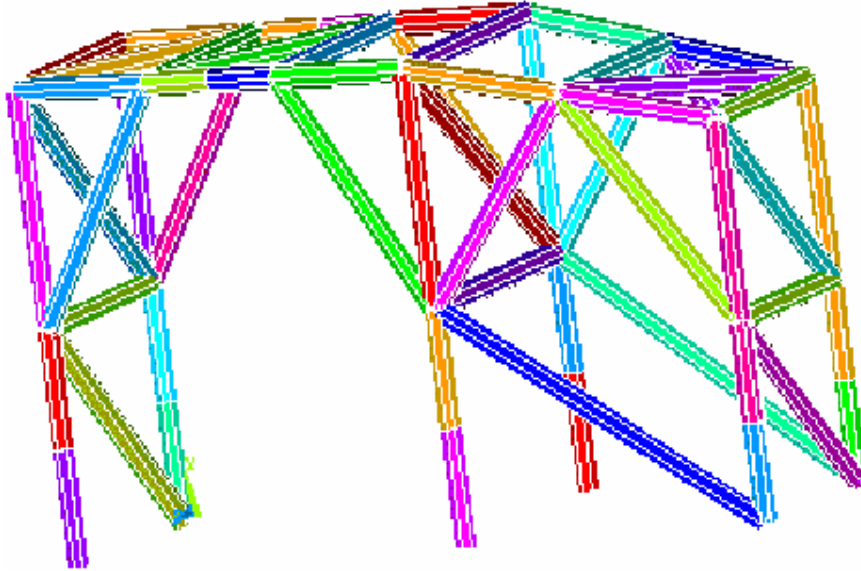


Figura 13 - Vista tridimensional da estrutura dimensionada através do programa computacional ANSYS, dividida em elementos.

No esforço frontal, as forças foram aplicadas nos nós dos elementos 9, 27 e 29, que correspondem à parte superior frontal da estrutura. A aplicação da força na parte traseira foi nos nós do elemento de número 3, localizado na parte superior traseira da estrutura.

As tensões obtidas em todos os elementos e o esquema correspondente à localização dos elementos na estrutura são apresentados no Apêndice C. Os elementos de número 47, 48, 73, 74, 59, 61, 57 e 55 estão localizados na parte inferior da estrutura, próximos aos pontos de fixação da estrutura ao chassi, onde ocorreram as maiores tensões, em torno de 360 MPa, ultrapassando o limite de tensão elástico do tubo utilizado na fabricação, que é de 343 MPa. A fim de solucionar o excesso de tensões nestes elementos, optou-se por outro tubo, de diâmetro externo de 0,084 m e espessura de 0,004 m (somente nestes elementos).

Os testes e pré-testes de tombamentos totalizaram em torno de 15 tombamentos laterais para a direita, nos quais a estrutura foi submetida a impactos

com a pista de concreto. Verificou-se apenas um deslocamento para a esquerda, em torno de 0,02 m, em um ponto de referência localizado a 0,8 m de altura do piso, no tubo central da estrutura.

A estrutura foi dimensionada para que não ocorresse deformação do tipo plástica e que fossem protegidos tanto o trator como o operador. Caso ocorresse deformação do tipo plástica, ela alteraria também a localização do centro de gravidade, o que prejudicaria o experimento. Segundo a norma NBR 10.000 (1987), na qual são especificados os requisitos estabelecidos para aceitação da estrutura submetida ao ensaio de EPCC, deformações plásticas são permitidas, desde que não invadam o espaço livre do operador, estabelecido na norma. O programa utilizado no dimensionamento fornece as deformações ocorridas em todos os elementos. Assim, é possível dimensionar a estrutura tomando como limites as deformações do tipo plástica permitidas pela norma, o que leva à redução dos reforços adicionados à estrutura.

3.4.3. Direcionamento e controle do trator nos testes

Com o objetivo de substituir o tratorista nas operações de direcionamento do trator e de desligamento do motor, nos testes de tombamento, idealizou-se um sistema por controle remoto, constituído por um motor elétrico reversível acoplado ao eixo de direção, para direcionamento das rodas-guias, e por um solenóide acoplado ao estrangulador, que desligava o motor de combustão interna do trator. Este sistema era dotado de um circuito eletrônico receptor de sinais de radiofrequência, para controle a distância dos motores elétricos utilizados. Os outros controles, como aceleração e marchas, foram regulados antes de se colocar o trator em movimento, e a embreagem foi acionada por corda fixada no pedal, através de comando manual.

3.4.4. Testes experimentais

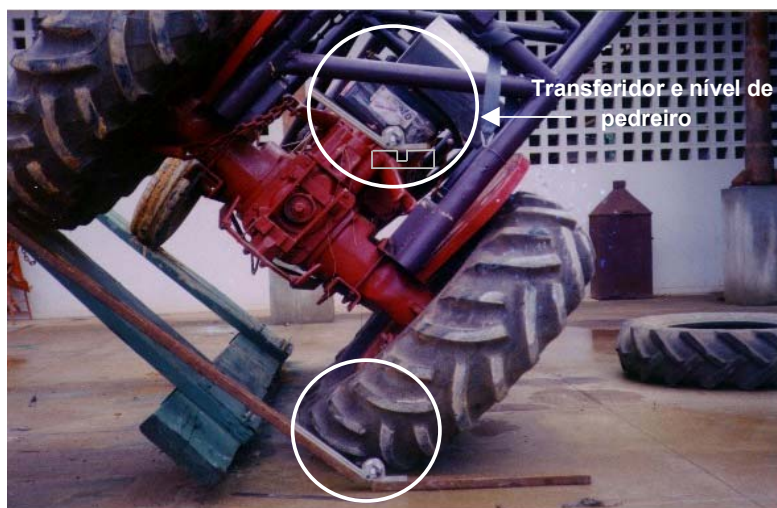
Foram conduzidos 12 testes de tombamentos laterais para direita, sendo seis estáticos e seis dinâmicos.

Nos testes estáticos, foram preparadas duas condições: com os quatro pneus sobre a plataforma inclinável (condição A) e, simulando uma operação em curva de nível, com os pneus esquerdos sobre a plataforma inclinável e os direitos sobre o piso plano (condição B). Nestes testes, utilizaram-se também duas pressões de enchimento para cada condição estática, a fim de avaliar a variação da pressão de enchimento na estabilidade. Mediram-se as deformações dos pneus, a bitola efetiva (distância entre os centros dos pneus traseiros, após deformações laterais) e o ângulo de inclinação do chassi e da pista, na iminência do tombamento (Figura 14).

O ângulo-limite de estabilidade foi medido com um transferidor, de precisão de 1° . Com este transferidor media-se a inclinação de uma haste com o mesmo comprimento da bitola traseira do trator, que foi posicionada de forma que a sua inclinação fosse a mesma do apoio dos pneus do trator na pista. O momento da medição foi estabelecida quando se percebeu o início do levantamento da roda traseira; depois de medidas as inclinações, reiniciava-se o levantamento da plataforma, para que ocorresse o tombamento, no qual quase não chegava a aumentar a inclinação da plataforma (Figura 14).

Nos testes de tombamento, na condição A, com os quatro pneus apoiados sobre a plataforma, o ângulo de inclinação foi medido com o transferidor na mesma forma da condição B, porém confirmava-se a medida do transferidor com a medida do ângulo do triângulo formado entre a plataforma e o piso (ver triângulo na Figura 14). As diferenças de um método de medição para outro não foram maiores que 1° .

Os testes dinâmicos foram realizados deslocando-se o trator com três posições transversais diferentes, correspondentes às inclinações da pista de 32° (62,5%), 34° (67,5%) e 36° (72,7%). Para cada inclinação, utilizaram-se duas velocidades de deslocamento, em que se media o raio de curva onde ocorria o tombamento. A pista permitiu diminuir o raio de curva ao se deslocar, aumentando com isso a ação da força centrífuga atuando no trator até o tombamento. O valor da velocidade dos testes foi estipulado de maneira que, para cada inclinação, o trator poderia iniciar seu deslocamento na pista sem o tombamento. Assim, foi possível avaliar a ação da força centrífuga atuando na estabilidade.



condição(B) - rodados apoiados de um lado em pista plana e do outro em uma plataforma inclinada.



condição (A) - rodados apoiados em uma plataforma de mesma inclinação

Figura 14 - O transferidor e a haste utilizados para medir o ângulo de inclinação do chassi e da pista, em um tombamento estático nas condições de apoio do rodado (B) e (A).

A inclinação de tombamento do trator na pista dos testes dinâmicos foi medida, também, pelo transferidor. O procedimento constituiu em medir a inclinação de uma haste de comprimento igual à bitola traseira do trator, que era colocada entre os centros de cada pneu. A medida da inclinação de tombamento foi feita primeiramente ao se destombar o trator. Tomava-se a medida com a haste e o transferidor no local onde o trator permanecia. Todos os testes foram filmados com uma filmadora da marca JVC, modelo nº GRAX727UM. Na edição da filmagem foi possível verificar a inclinação do trator no momento do tombamento, por meio do posicionamento transversal do trator em relação à faixa marcada na pista, que delimita a inclinação do trator em função da posição transversal (Figura 5).

A velocidade foi determinada verificando-se o tempo que o trator levou para percorrer intervalos de cinco metros, marcados na posição central da pista. A cada passagem do trator por estas marcas foi emitido um som provocado por impacto entre dois metais, que foi gravado pelo microfone da mesma filmadora. Na edição da filmagem dos tombamentos, utilizou-se o cronômetro do equipamento com precisão de 1/30 s, para determinar o intervalo de tempo do som emitido pelos metais.

O raio de curva foi determinado por uma trena de precisão de 0,01 m, medindo-se a distância entre o centro da pista e o centro do eixo traseiro do trator, no local do tombamento (Figura 15).



(1) - vista parcial da pista de testes e o trator após tombamento.



(2) medição do raio de curva no local do tombamento.

Figura 15 -Vista parcial da pista de testes e medição do raio de curva.

3.4.5. Testes comparativos entre os valores simulados pelo modelo desenvolvido, as equações propostas por ASHBURNER e SIMS e MIALHE e os dados experimentais

Por simulação, foram obtidos os valores dos ângulos de inclinação, quando a reação do pneu traseiro atingia valor igual a zero, para cada condição de operação dos 12 testes experimentais (Quadro 1).

Na comparação entre valores de ângulo de inclinação obtidos por simulação e valores experimentais, utilizou-se o método gráfico, denominado gráfico de correspondência. Os valores experimentais foram plotados na ordenada, enquanto os valores simulados com o emprego do modelo foram plotados na abscissa. Se os pontos plotados coincidem com a linha de 45°, passando pela origem, diz-se que há perfeita correspondência entre os valores experimentais e simulados ($Y=X$). Determinou-se também, pela equação 63, o erro relativo médio entre os valores experimentais e simulados do ângulo de tombamento.

Quadro 1 - Condições em que se realizaram os testes experimentais de tombamento

Testes	Condição pista	Ângulo de inclinação		Raio de curva (m)	Velocidade (m.s ⁻¹)	Força centrífuga calculada (N)	Pressão de enchimento (kPa)			
		da pista (graus)	do chassi (graus)				fd	fe	td	te
1	B	32		6,2	1,52	687,53	165	124	76	48
2	B	32		8,15	1,82	749,86	165	124	76	48
3	B	34		5,6	1,74	997,49	165	124	76	48
4	B	34		5,15	1,36	662,62	165	124	76	48
5	B	36		4,8	1,23	581,52	165	124	76	48
6	B	36		6,15	1,08	349,92	165	124	76	48
7	B	39	44				165	124	76	48
8	B	39	44				165	165	83	83
9	B	38	44				165	165	28	83
10	A	37,3	41				165	124	76	48
11	A	36,36	42				165	165	83	83
12	A	35,89	41				165	165	28	83

*Os testes de 1 a 6 foram dinâmicos, os de 7 a 12, estáticos.

*B = testes realizados com os pneus do lado direito apoiados em pista plana e os do lado esquerdo apoiados em pista inclinada (Figura 15).

*A = testes realizados com os quatro pneus apoiados em uma mesma inclinação.

$$\text{erro} = \frac{\sum_1^n \left| \frac{\theta_{\text{exp.}} - \theta_L}{\theta_{\text{exp.}}} \right| \cdot 100}{n} \quad \text{eq.(63)}$$

em que

erro = erro relativo médio (%);

$\theta_{\text{exp.}}$ = ângulo de inclinação observado experimentalmente (graus);

θ_L = ângulo de inclinação obtido por simulação (graus); e

n= número de teste de tombamento.

Verificou-se também a variação da força centrífuga nos testes experimentais, por meio de um gráfico com os valores de ângulo de inclinação de tombamento, na ordenada, em função da variável força centrífuga, na abscissa; nesta análise, as outras variáveis mantiveram-se constantes. Com isso, pode-se avaliar o efeito da força centrífuga na estabilidade para tombamentos laterais.

Na análise sobre deslizamento, foram mostrados os testes nos quais o deslizamento se deu antes do tombamento e em quais pneus isso ocorria.

3.4.6. Simulações para estudo do comportamento do trator em situações diversas de operação e análise de sensibilidade das medidas geométricas e ponderais do trator

Foram desenvolvidas inicialmente comparações entre os valores simulados e os valores experimentais, com o trator trabalhando em curva de nível ($\varphi=90^\circ$). O modelo foi utilizado também para estudar os limites de inclinação e as velocidades máximas para diferentes situações de operação (Figura 16). Nas simulações de todos os testes descritos nesta figura, mantiveram-se as mesmas condições de pressão de enchimento e altura de garras dos pneus, bitolas traseira e frontal, localização do cg, medidas do trator e tipo de solo, a fim de melhor avaliar a variação do ângulo de posição (φ) do trator em uma pista inclinada.

Seguem as condições simuladas dos testes, utilizadas para avaliar as situações diversas de operação descritas na Figura 16:

1) O trator trafegando em uma pista plana, fazendo curva para direita de 5 m de raio, em que se determinou a velocidade máxima permitida para o tombamento.

$$\theta = 0^\circ, r = -5\text{m (ou } \delta = -22,34^\circ), \varphi=90^\circ, V=?$$

2) O trator trafegando em uma pista plana, fazendo curva para esquerda de 5 m de raio, em que se determinou a velocidade máxima permitida para o tombamento.

$$\theta = 0^\circ, r = 5\text{m (ou } \delta = 22,34^\circ), \varphi=90^\circ, V=?$$

3) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita, operando em aclive, em linha reta.

$$\theta=?, \delta = 0^\circ, \varphi=0^\circ.$$

4) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita de um trator operando em aclive, em linha reta, submetido a uma força longitudinal na barra de tração (FBT) de 10.000 N.

$$\theta=?, \delta = 0^\circ, \varphi=0^\circ, \text{FBT}=10.000 \text{ N.}$$

5) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em declive, em linha reta.

$$\theta=?, \delta = 0^\circ, \varphi=180^\circ.$$

6) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em declive, submetido a uma força longitudinal na barra de tração de 10.000 N.

$$\theta=?, \delta = 0^\circ, \varphi=180^\circ, \text{FBT} = 10.000 \text{ N.}$$

7) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em linha reta, posicionado em um ângulo φ de 45° na pista inclinada.

$$\theta=?, \delta = 0^\circ, \varphi=45^\circ.$$

8) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em curva para esquerda, posicionado em um ângulo φ de 45° na pista inclinada.

$$\theta=?, r = 5\text{(ou } \delta = 22,34^\circ), \varphi=45^\circ, V = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

9) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em linha reta, posicionado em um ângulo φ de 135° na pista inclinada.

$$\theta=?, \delta = 0^\circ, \varphi=135^\circ.$$

10) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em curva para esquerda, posicionado em um ângulo φ de 135° na pista inclinada.

$$\theta=?, r = 5(\text{ou } \delta = 22,34^\circ), \varphi=135^\circ, V=3 \text{ m.s}^{-1}.$$

11) Determinou-se o limite do ângulo de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em curva para direita, posicionado em um ângulo φ de 135° na pista inclinada.

$$\theta=?, r=- 5(\text{ou } \delta = - 22,34^\circ), \varphi=135^\circ, V=3 \text{ m.s}^{-1}.$$

12) Foram determinados os limites dos ângulos de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em curva para direita, posicionado em um ângulo φ de 90° na pista inclinada, com as velocidades de deslocamento de 1,5 e 3,0 m.s^{-1} .

$$\theta=?, r=- 5(\delta = - 22,34^\circ), \varphi=90^\circ \text{ e } V=1,5 \text{ e } 3,0 \text{ m.s}^{-1}.$$

13) Determinaram-se os limites dos ângulos de estabilidade em uma pista inclinada para direita, de um trator operando em curva para esquerda, posicionado em um ângulo φ de 90° na pista inclinada, com as velocidades de deslocamento de 1,5 e 3,0 m.s^{-1} .

$$\theta=?, r = 5(\delta = 22,34^\circ), \varphi=90^\circ \text{ e } V=1,5 \text{ e } 3,0 \text{ m.s}^{-1}.$$

14) Foram determinados os limites dos ângulos de estabilidade em uma pista inclinada para esquerda, de um trator operando em linha reta e em curva, posicionado em um ângulo φ de 60° na pista inclinada, com as velocidades de deslocamento de 1,5 e 3,0 m.s^{-1} .

$$\theta=?, r = 5 \text{ m}(\text{ou } \delta = 22,34^\circ), \text{ e } V=1,5 \text{ e } 3,0 \text{ m.s}^{-1}.$$

Na análise de sensibilidade do modelo, as variáveis de entrada referentes às medidas geométricas e ponderais do trator foram: bitola; localização vertical, transversal e longitudinal do cg; e distância entre os eixos (X_L).

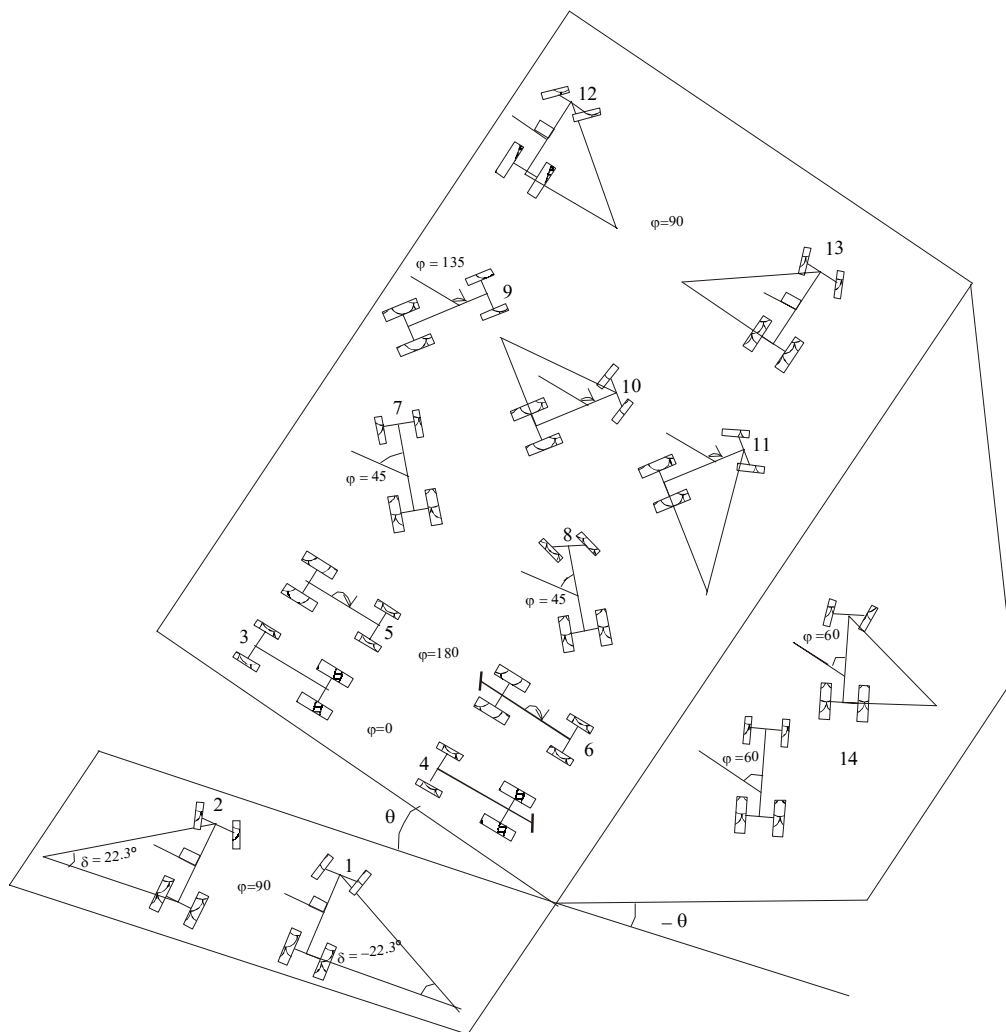


Figura 16 - Situações diversas de operação com tratores em três inclinações diferentes de pista: plana (testes 1 e 2); inclinada para a direita (testes 3 a 13); e inclinada para a esquerda (teste 14), simuladas no programa computacional para determinar o limite de estabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Centros de gravidade e massas e medidas do trator utilizados na simulação

O trator agrícola utilizado neste trabalho, para verificação do programa computacional, é da marca Valmet, modelo 360D, ano 66, potência do motor de 30,6 kW, com as seguintes características:

- $B_t = 1,44$ m;
- $B_f = 1,44$ m;
- $W_f = 7.966$ N;
- $W_{f\beta} = 6.730$ N;
- $m_{tf} = 1.984$ kg;
- $m_f = 139$ kg;
- $m_p = 1.845$ kg;
- $W_d = 9.434$ N;
- $X_L = 1,95$ m;
- $X_{L\beta} = 1,86$ m;
- $R_t = 0,609$ m;
- $\beta = 20,35^\circ$;
- pneus traseiros = tipo R1 - diagonais, seis lonas e medidas 14.9 – 24, com altura de garras de 29,0 mm, $P_{tk} = 83$ kPa; e

- Pneus frontais = tipo F1 - diagonais, oito lonas e medidas 7.50 – 16, com altura de friso de 23,0 mm, $P_{fk}= 165$ kPa utilizando, ar para seu enchimento.

O centro de gravidade (cg) do trator foi determinado em duas partes (cgf e cgp), considerando a massa do eixo frontal, localizada no cgf, e a massa parcial, localizada no cgp. Utilizando a metodologia proposta, foram calculadas as coordenadas do centro de gravidade e a massa das partes do trator caracterizado anteriormente, encontrando-se os valores no Quadro 2.

Quadro 2 -Coordenadas do centro de gravidade e massas do trator de testes

Partes	X(m)	Y(m)	Z(m)	Massa(kg)
cgt	0,798	-0,022	0,911	1984
cgf	2,02	0,0	0,46	139
cgp	0,706	-0,024	0,945	1845

4.2. Verificação dos valores simulados e experimentais

O programa computacional desenvolvido no presente trabalho, a fim de simular o limite do ângulo de inclinação da pista para tombamento, encontra-se no Apêndice A. O exemplo da utilização deste programa encontra-se no Apêndice B.

As condições de entrada de dados utilizadas no programa computacional para obter a inclinação-limite de tombamento foram as mesmas usadas nos testes experimentais. Essas condições são apresentadas no Quadro 1. Os resultados obtidos de inclinação-limite para tombamentos experimentais e os valores calculados pelo modelo proposto e pelas equações de ASHBURNER e SIMS (1984) e MIALHE (1980) são apresentados no Quadro 3.

Analisando os valores de inclinação em que ocorreu o tombamento, em função da variação da força centrífuga dos testes dinâmicos de 1 a 6, apresentados na Figura 17, verificou-se, de acordo com os valores obtidos tanto na simulação quanto no experimento, que houve tendência de menor estabilidade com o aumento da força centrífuga, mesmo esta tendo variado pouco, de 349,92 N a 997,49 N.

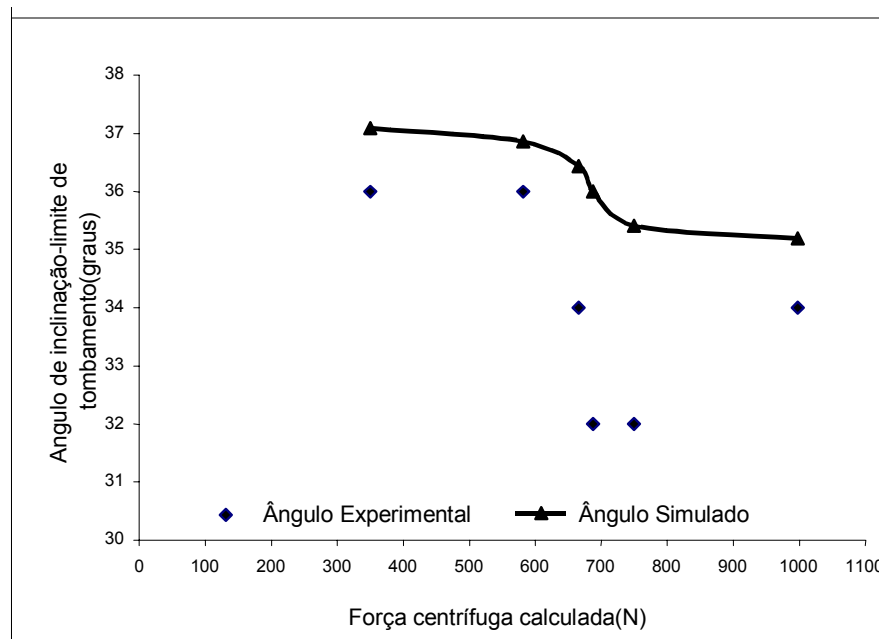


Figura 17 - Ângulo de inclinação do limite de tombamento (y) em função da força centrífuga calculada (x).

No Quadro 3 são apresentados os resultados de todos os testes realizados para verificação do modelo. A fim de avaliar a influência da pressão de enchimento na estabilidade lateral, alterou-se somente a pressão de enchimento do pneu, do teste 7 para o teste 9, diminuindo a pressão do lado do tombamento e aumentando do lado oposto, mantendo-se as outras variáveis constantes. Observou-se, no teste experimental, que o limite de tombamento variou de 39° para 38° e, na simulação, de 36,7° para 34,6°. Verificou-se então, que a pressão de enchimento dos pneus para uma situação desfavorável à

estabilidade, pode reduzir o limite do ângulo de tombamento em 1° no experimento e $2,1^\circ$ pela simulação.

Analisando os testes estáticos (7 e 10) apresentados no Quadro 3, em que se variou somente a situação de apoio dos rodados (no teste 7-B os pneus do lado direito encontravam-se apoiados em uma pista plana e os do lado esquerdo em uma pista inclinada, e, no teste 10-A, os rodados estavam apoiados em uma pista de mesma inclinação), observou-se, no primeiro, que o valor do ângulo de tombamento experimental teve maior estabilidade-limite da pista, medindo 39° , com o ângulo do chassi medindo 44° , enquanto em 10-A ele foi de $37,3^\circ$, e o do chassi, de 41° . Analisando-se a diferença do limite do ângulo de inclinação da pista e do chassi experimentais dos testes anteriores, ela foi de $1,7^\circ$ e 3° , respectivamente; pelo cálculo obtido no modelo, não houve diferença nos limites de estabilidade de um teste para o outro, pois, nos cálculos de estabilidade do modelo, considera-se somente a condição A, uma vez que ela é mais comum em operações com tratores cujos rodados estão apoiados em uma pista de mesma inclinação. Além disso, na condição de apoio B, as reações verticais e laterais que atuaram nos pneus foram além da extremidade da banda de rodagem, tornando difícil a modelagem.

No caso do teste 9-B, para uma baixa pressão do pneu do lado do tombamento ($P_{td} = 28 \text{ kPa}$), o apoio chegou próximo ao aro da roda e ainda não havia ocorrido o tombamento, confirmando a dificuldade de se modelar a situação B, que se assemelha ao trator trabalhando com a roda dentro de um sulco.

No modelo proposto, considerou-se que as reações verticais e laterais estão localizadas nas extremidades da banda de rodagem dos pneus. Já nos cálculos em que se utilizaram as equações propostas por ASHBURNER e SIMS (1984) e MIALHE (1980) a reação vertical foi admitida como agindo no centro dos pneus, não se considerando as suas deformações e que estas não afetam na inclinação do trator.

Quadro 3 -Valores de inclinação obtidos por experimento, por simulação segundo o modelo proposto, pela equação de ASHBURNER e SIMS (1984) e pela equação de MIALHE (1980)

Testes	Ângulo de inclinação				Raio de curva (m)	Velocidade (m.s ⁻¹)	Força centrífuga calculada (N)	Condição de apoio rodados	Ângulo de inclinação do chassi simulado e experimental (graus)
	tombamento experimental (graus)	limite simulado (graus)	limite pela equação ASHBURNER (graus)	limite pela equação de MIALHE (graus)					
1	32	36,01	32,59	19,15	6,20	1,52	687,53	B	39,9
2	32	35,41	32,44	19,15	8,15	1,82	749,86	B	39,3
3	34	35,19	31,79	19,15	5,60	1,74	997,49	B	39,1
4	34	36,44	32,64	19,15	5,15	1,36	662,62	B	40,4
5	36	36,86	32,90	19,15	4,80	1,23	581,52	B	40,8
6	36	37,09	33,45	19,15	6,15	1,08	349,92	B	41,0
7	39	36,70	34,38	38,30	*	0	0	B	40,5-44**
8	39	36,90	34,38	38,30	*	0	0	B	40,5-44**
9	38	34,65	34,38	38,30	*	0	0	B	40,5-44**
10	37,3	36,70	34,38	38,30	*	0	0	A	40,5-41**
11	36,4	36,90	34,38	38,30	*	0	0	A	40,5-42**
12	35,9	34,65	34,38	38,30	*	0	0	A	40,5-41**

Testes de 1 a 6 foram dinâmicos, e os de 7 a 12 estáticos.

Testes de 1 a 7 e 10, P_{fd}= 165, P_{fe}=124, P_{td}=76, P_{te}=48, (kPa).

Testes 8 e 11, P_{fd}= 165, P_{fe}=165, P_{td}=83, P_{te}=83, (kPa).

Testes 9 e 12, P_{fd}= 165, P_{fe}=165, P_{td}=28, P_{te}=83, (kPa).

A = testes de tombamento com o trator apoiado com os rodados sobre uma pista de mesma inclinação.

B = testes de tombamento com o trator apoiado com os rodados do lado do tombamento sobre pista plana, e os do outro, sobre pista inclinada.

* = testes com os pneus frontais em linha reta.

** = ângulos de inclinação do chassi medidos na iminência do tombamento.

Os valores obtidos por simulação dos ângulos de inclinação do chassi, no limite de estabilidade do ângulo da pista, foram comparados com os valores dos ângulos dos chassis medidos no experimento na iminência do tombamento (Quadro 3). Observou-se, para a condição A, diferença dos valores simulados, em relação aos experimentais, de $0,5^\circ$ (41° - $40,5^\circ$) e $1,5$ (42° - $40,5^\circ$), e, para a condição B, de $3,5^\circ$ (44 - $40,5$). Assim, comprovou-se novamente, pela análise da inclinação do chassi na iminência do tombamento, que a condição B obteve maior estabilidade do que a condição A.

No Quadro 5 é apresentado o cálculo do erro relativo médio, em relação aos valores dos ângulos-limite de inclinação calculados com os valores obtidos experimentalmente. Observa-se que o erro relativo médio obtido pelo modelo proposto foi de 5,5%; utilizando-se a equação proposta por ASHBURNER e SIMS, de 6,7%; e, pela equação de MIALHE, de 23,3%. Para fins de engenharia, o erro obtido no modelo proposto pode ser utilizado para estimar o limite de estabilidade lateral nesta faixa estudada, sem considerar outros fatores não avaliados neste trabalho, como depressões ou elevações na pista, oscilação do trator em pistas irregulares, folgas nos eixos da roda e deslocamento dos lubrificantes e combustíveis. O erro relativo médio utilizando os cálculos de inclinação dinâmica pela equação de MIALHE foi de 43%, pelo fato de se determinar o limite dinâmico simplesmente pela multiplicação por uma constante de 0,5 no valor do limite de inclinação estático. No entanto, esta constante considera todos os outros fatores que influem na instabilidade.

Na Figura 18 vê-se o gráfico de correspondência entre os valores-limite de inclinação de tombamento, calculados pelo modelo e pela equação de ASHBURNER e SIMS, e os valores experimentais. Esses resultados mostram uma tendência de superestimar, pelo modelo, os valores dos testes de inclinação dinâmicos, obtendo-se erros de 6,5%, e de subestimar os valores dos testes estáticos, com erro de 4,5%. Os testes que mais se aproximaram da linha de correspondência, obtendo-se melhor correlação entre simulados e experimentais, foram os estáticos, na condição de todos os rodados apoiados em uma mesma inclinação, uma vez que se obteve erro relativo médio de 2,3%. Os valores calculados pela equação de ASHBURNER e SIMS mostraram tendência de subestimar todos os valores, com erro de 6,7%.

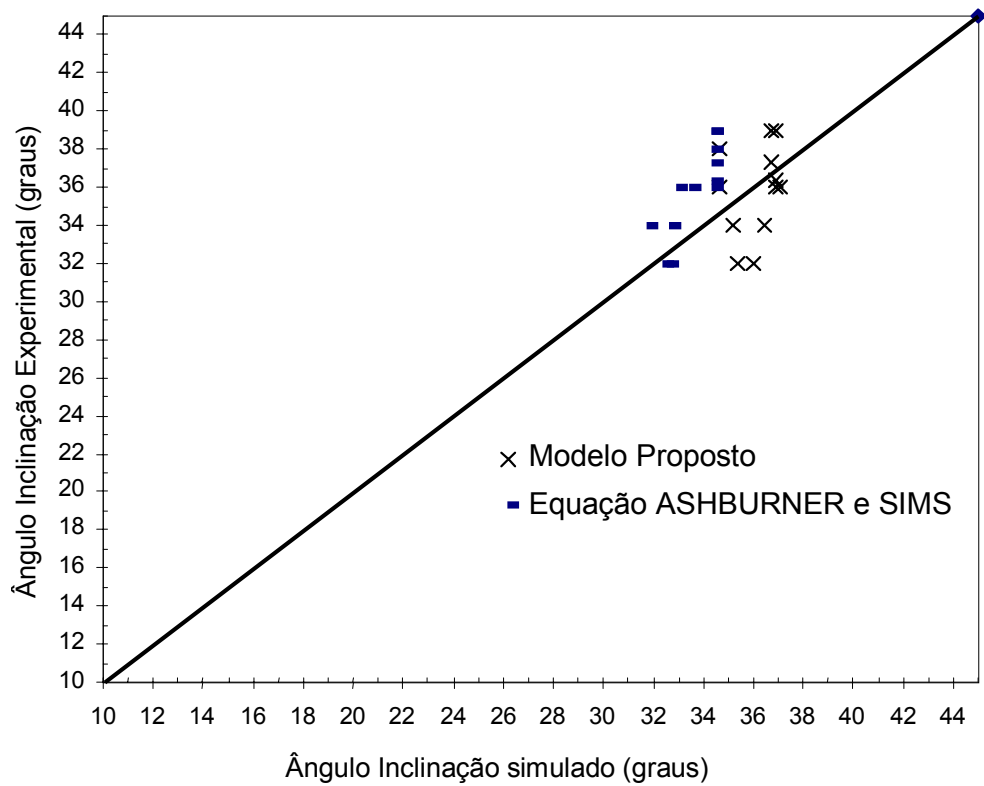


Figura 18 - Gráfico de correspondência entre os valores simulados de inclinação de tombamento, através do modelo proposto e da equação de ASHBURNER e SIMS, e os valores determinados experimentalmente.

Quadro 4 - Resultado do erro relativo (%) entre dados experimentais e simulados pelo modelo proposto, experimentais e equação de ASHBURNER e SIMS, e experimentais e equação de MIALHE, separados por testes

Testes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Modelo proposto(%)	12,5	10,7	3,5	7,2	2,4	3,0	5,9	5,4	8,8	1,6	1,5	3,70
Equação ASHBURNER e SIMS(%)	1,8	1,4	6,5	4,0	8,6	7,1	11,8	11,8	9,5	7,8	5,4	4,4
Equação MIALHE(%)	40,2	40,2	43,7	43,7	46,8	46,8	1,8	1,8	0,8	2,7	5,3	6,4

Quadro 5 - Resultado do erro relativo médio (%) em relação aos dados experimentais, separados por tipos dos testes, em todos os testes (1 a 12), nos dinâmicos (1 a 6), nos estáticos (7 a 12), nos apoiados em condição B (1 a 9) e nos apoiados em condição A (10 a 12), pelo modelo proposto, pela equação de ASHBURNER e SIMS e pela equação de MIALHE

Testes	Modelo proposto (%)	Equação de ASHBURNER e SIMS (%)	Equação de MIALHE (%)
Todos (1 a 12)	5,5	6,7	23,3
Dinâmico (1 a 6)	6,5	4,9	43,5
Estático (7 a 12)	4,5	8,5	3,1
Condição B (1 a 9)	6,6	7,1	29,5
Condição A (10 a 12)	2,3	5,9	4,8

Analisando os resultados apresentados no Quadro 5, verifica-se que o modelo matemático proposto foi o que apresentou menor erro total em relação aos outros métodos. Nos testes experimentais realizados na condição dos rodados apoiados em uma mesma inclinação (condição A), o erro seria menor ainda para o modelo proposto (situação A, 10 a 12, erro médio de 2,3%). A situação do trator trafegando com os rodados apoiados em pistas de inclinações diferentes (condição B) só foi feita desta forma devido à facilidade de se poder variar a inclinação do trator em situações dinâmicas, modificando sua posição transversal na pista. Seria inviável, neste trabalho, construir pistas de concreto com inclinações diferentes para verificação do modelo.

Quadro 6 - Valores obtidos por simulação das reações verticais e laterais e força de aderência dos pneus, em newtons, dos testes experimentais

Testes exper.	R _{te} (N)	R _{tdn} (N)	R _{fe} (N)	R _{fdn} (N)	L _{te} (N)	Fa _{te} (N)	L _{tdn} (N)	Fa _{tdn} (N)	L _{fe} (N)	Fa _{fe} (N)	L _{fdn} (N)	Fa _{fdn} (N)	Ângulo de inclinação limite simulado(graus)
1-B	0,57	12068	394	7084	0,47	1445	16,6	8112	428	1638	929	2892	36,01
2-B	1,25	11962	504	6960	1,05	1445	152	8054	513	1641	753	2839	35,41
3-B	5,28	12119	345	7135	4,43	1447	179	8141	387	1637	1154	2914	35,19
4-B	2,51	12159	295	7221	2,1	1446	87	8164	343	1636	1125	2951	36,44
5-B	2,54	12200	249	7295	2,13	1446	181	8186	299	1635	1189	2983	36,86
6-B	0,98	12063	390	7102	0,82	1445	211	8110	425	1638	804	2899	37,09
7-B	-10,7	11659	813	6771	-9,0	1437	68,5	7887	707	1653	59	2762	36,70
8-B	-13,1	11662	812	6773	-11,1	1437	68,5	7701	706	1406	59	2762	36,90
9-B	-9,33	11657	814	6770	-7,87	1439	68,4	9173	707	1406	59	2761	34,65
	R _{te}	R _{td}	R _{fe}	R _{fd}	L _{te}	Fa _{te}	L _{td}	Fa _{td}	L _{fe}	Fa _{fe}	L _{fd}	Fa _{fd}	
10-A	-10,7	8909	813	5110	-9,0	1437	7520	6367	707	1653	4443	2170	36,70
11-A	-13,1	8910	812	5110	-11,1	1437	7525	6224	706	1406	4445	2170	36,90
12-A	-9,33	8909	814	5110	-7,87	1439	7518	7350	708	1406	4442	2170	34,65

Testes de 1 a 7 e 10, P_{fd}= 165, P_{fe}=124, P_{td}=76, P_{te}=48, (kPa).

Testes 8 e 11, P_{fd}= 165, P_{fe}=165, P_{td}=83, P_{te}=83, (kPa).

Testes 9 e 12, P_{fd}= 165, P_{fe}=165, P_{td}=28, P_{te}=83, (kPa).

A = testes de tombamento com o trator apoiado com os rodados sobre uma pista de mesma inclinação.

B = testes de tombamento com o trator apoiado com os rodados do lado do tombamento sobre em pista plana, e os do outro, sobre pista inclinada.

No Quadro 6 podem-se ver os valores das reações verticais e laterais e a força de aderência dos pneus fornecidos pelo programa para cada teste, simuladas as condições de entrada dos dados experimentais. A reação vertical, nos pneus traseiros esquerdos, apresentou-se com o menor valor das reações verticais, comparados com os outros pneus, o que era de se esperar, uma vez que nos testes experimentais ocorreram tombamentos para a direita, e o tombamento lateral inicia-se quando a reação de um dos pneus traseiros é zero, ou negativa.

Para análise do deslizamento, foi implementada ao programa a condição de apoio dos rodados B, em que o trator está apoiado com o pneu do lado direito em pista plana. Assim, as forças de aderência e as reações laterais dos rodados apoiados na parte plana são calculadas como paralelas ao plano de apoio da pista e não ao plano do trator. Verificou-se então, pelo cálculo no modelo, que as forças de aderência dos pneus nos testes 1-B a 9-B foram superiores às reações laterais. De fato, isso foi confirmado nos testes experimentais, onde não ocorreu deslizamento antes do tombamento.

Para a condição dos rodados apoiados em uma pista de mesma inclinação (condição A, testes 10-A a 12-A), nos pneus do lado direito, ou seja, do lado do tombamento, as reações laterais foram maiores do que as forças de aderência dos pneus ($L_{fd} > Fa_{fd}$, $L_{td} > Fa_{td}$), isto é, ocorreria o deslizamento antes do tombamento. No entanto, no teste experimental, não foi possível confirmar o deslizamento, pois na plataforma utilizada para inclinar o trator, nesses testes, havia uma elevação lateral na qual se encaixava o trator, impedindo o deslizamento.

Analisando, nos testes simulados, as condições experimentais, as forças de aderência dos pneus traseiros esquerdos, o modelo superestimou seus valores, pois, quando as reações verticais são nulas, não deveria haver aderência dos pneus ao solo nesse momento. Entretanto, as equações empíricas utilizadas no modelo, que estimaram as forças de aderência dos pneus, foram obtidas por regressão de valores experimentais em uma faixa de reações verticais nos pneus superiores a 2.825 N. Na análise do deslizamento nos pneus, quando a reação vertical foi nula ou apresentou valores baixos, as equações que determinam a aderência dos pneus não estimaram com valores

satisfatórios. Na análise sobre o deslizamento, quando a reação vertical é nula, considera-se que a força de aderência também é nula.

4.3. Simulações para estudo do comportamento do trator em situações diversas de operação e análise de sensibilidade das medidas geométricas e ponderais do trator

No Quadro 7 são apresentados os valores obtidos por simulação, para as operações descritas na Figura 16, da inclinação-limite da pista e do chassi, das reações verticais em todos os pneus, o lado do tombamento e a localização dos pneus em que a força de aderência não suportou a reação lateral (houve deslizamento).

Analisando somente o deslizamento dos pneus nos testes simulados no Quadro 7, observou-se que, nos testes onde ocorreria tombamento lateral, o deslizamento dos pneus aconteceu primeiramente em todos; no entanto, com acréscimo relativamente pequeno na inclinação de pista onde ocorreu o deslizamento, ocorreria o tombamento lateral.

Em relação aos testes simulados com o trator deslocando-se em pista plana, no teste 1, em uma operação de curva de 5 m para a direita, a velocidade máxima permitida foi de $5,92 \text{ m.s}^{-1}$ ($21,3 \text{ km.h}^{-1}$), e o tombamento teria sido para esquerda. Já no teste 2, fazendo uma curva de mesmo raio, só que de lado contrário, em uma curva para a esquerda, a velocidade em que ocorreria o tombamento seria de $6,17 \text{ m.s}^{-1}$ ($22,2 \text{ km.h}^{-1}$), com o tombamento para o lado direito do trator. Assim, pôde-se ver que o modelo foi sensível à localização do centro de gravidade na direção transversal ao trator (eixo Y), pois o trator utilizado nestas simulações possui o centro de gravidade deslocado para a esquerda em $-0,022 \text{ m}$; por isso, ele possui menor estabilidade para tombamentos laterais para esquerda.

Em uma operação de aclave (testes 3 e 4) (Quadro 7), o trator virou para trás (reação nos pneus frontais iguais a zero) em um ângulo da pista de $41,3^\circ$; simulando uma força na barra de tração de 10.000 N , o ângulo-limite caiu para $31,5^\circ$, devido ao efeito da transferência de peso do eixo frontal para o traseiro, que influi no cálculo do balanço das forças e dos momentos que atuam no trator.

Quadro 7 - Simulações realizadas para estudar o comportamento do trator em situações diversas de operação, de acordo com a Figura 16 e os dados do trator (item 4.1, $P_{fe}=P_{fd}=165$ kPa e $P_{td}=P_{te}=83$ kPa), considerando o trator com os quatro pneus apoiados em uma mesma inclinação (condição A)

Testes simulados	Ângulos		Velocidade de deslocamento $m.s^{-1}$	Raio de curva (m)	Ângulo inclinação do chassi no limite de estabilidade (gr)	Força centrífuga calculada (N)	Pneu em que a força de aderência foi menor do que a reação lateral	Rte (N)	Rtd (N)	Rfe (N)	Rfd(N)	Lado do tombamento
	Inclinação-limite da pista simulado, θ ,(graus)	Posição do trator com relação à pista inclinada, φ ,(gr)										
1	0	90	5,92	-5	-4,8	-13909	te, fe	11801	-12,4	5861	601	Esq
2	0	90	6,17	5	4,84	15016	td, fd	-3,82	11794	345	6012	Dir
3	41,3	0	0	*	-0,1	0		7516	7258	-0,73	-129	P/ trás
4-FBT	31,5	0	0	*	-0,13	0		8528	8202	-3,7	-106	P/ trás
5	50,7	180	0	*	-0,17	0		410	-12,6	5899	6050	Esq
6-FBT	58,6	180	0	*	-0,15	0		378	-3,0	4807	4974	Esq
7	32,1	45	0	*	24,28	0	fd, fe	3847	9400	-15,4	2624	**
8	22,5	45	3	5	18,35	3571	fd, fe	3263	9996	-0,17	3171	**
9	33,07	135	0	*	24,93	0	td	-0,72	5575	3602	6474	Dir
10	24,9	135	3	5	20,11	3571	td, fd	-2,49	6930	2699	6176	Dir
11	42,1	135	3	-5	30,07	-3571	td	-0,72	4437	4372	6736	Dir
12	37,67	90	1,5	-5	41,1	-893	td, fd	-0,18	8533	1307	5431	Dir
12.1	45,38	90	3	-5	48,9	-3571	td, fd	-1,45	8666	1327	5515	Dir
13	36,19	90	1,5	5	39,98	893	td, fd	-0,92	9332	275	4757	Dir
13.1	28,37	90	3	5	32,22	3571	td, fd	-0,98	9477	279	4832	Dir
14	-29,92	60	0	*	-28,52	0	te, fe	7266	-0,11	6052	2947	Esq
14.1	-28,91	60	1,5	-5	-27,85	-893	te, fe	7689	-1,2	5807	2502	Esq
14.2	-22,08	60	3	-5	-22,35	-3571	te, fe	8285	-1,47	5733	2140	Esq

FBT = simulação com força na barra de tração de 10.000 N.

Para um observador traseiro:

ângulo φ varia de $[0^\circ, 180^\circ]$, sentido horário;

ângulo θ varia de $[0^\circ, 90^\circ]$, inclinação para a direita(sentido horário); $[0^\circ, -90^\circ]$, inclinação para a esquerda (sentido anti-horário);

r(+), curva para a esquerda; r(-), curva para a direita.

* = testes com os pneus frontais em linha reta.

**= testes em que ocorreu reação negativa primeiro nos pneus frontais para tombamento lateral.

Na operação do trator em declive (testes 5 e 6 – Quadro 7), o ângulo-limite de estabilidade foi de 50,7°, e o tombamento foi lateral para esquerda; apesar do trator em operação de declive, esperava-se um possível tombamento para frente, o que não ocorreu. O tombamento lateral foi para esquerda, em razão de o centro de gravidade do trator estar deslocado transversalmente para este lado. Aplicando uma força na barra de tração de 10.000 N (teste 6), o limite de tombamento lateral foi ainda maior, de 58,6°, ou seja, a força na barra de tração, neste caso, contribuiu para a estabilidade, um vez que, com a força na barra de tração, a transferência de peso para o eixo traseiro estabiliza mais para um tombamento lateral.

As simulações realizadas nos testes 7 e 8 mostram um trator subindo por uma diagonal em uma pista inclinada. A reação vertical nula no apoio dos pneus ao solo ocorreu primeiramente no pneu frontal esquerdo (lado de cima) para estes testes, e a força de aderência nos pneus frontais direito e esquerdo foi inferior à reação lateral nestes. Como o pneu esquerdo já está com reação vertical nula e o frontal direito já perdeu aderência, o trator perderia a dirigibilidade ou deslizaria antes de tombar, com a pista em uma inclinação de 32,1 e 22,5°, respectivamente. Somente nos testes que representam o trator subindo por uma diagonal em uma pista inclinada, compreendidos nos ângulos de posição (φ) de 0° a 80°, ocorreram reações nulas primeiramente no pneu frontal antes do traseiro.

Nas simulações dos testes 9, 10 e 11 (Quadro 7), o trator desce por uma diagonal em uma pista inclinada ($\varphi = 135^\circ$). No teste 9, operando em linha reta, o limite foi de 33,07°, e, ao se fazer uma curva para a esquerda (teste 10), o limite caiu para 24,9°, porém, fazendo a curva para a direita (teste 11), este subiu para 42,1°. Verificou-se, entre os testes simulados, que os testes 9, 10 e 11 foram os que apresentaram menores ângulos de tombamento, comparados em condições semelhantes de velocidade de deslocamento e raio de curva, alterando apenas, nestes testes em relação aos outros, o posicionamento do trator (φ).

Nos testes 12, 12.1, 13 e 13.1 (Quadro 7) as situações foram semelhantes às dos testes experimentais, ou seja, operou-se em curva de nível ($\varphi = 90^\circ$). Nestes testes ocorreria o deslizamento antes do tombamento, e os

pneus onde o deslizamento ocorre estavam do lado em que o trator tombaria (lado direito). Caso estivessem apoiados com os rodados do lado do tombamento em uma pista plana, como nos testes experimentais, seria aumentada a aderência dos pneus ao solo e o trator tombaria antes do deslizamento, com os limites de inclinação da pista de 37,67°, 45,38°, 36,19° e 28,37°, respectivamente. Verificou-se que nos testes 13 e 13.1 ocorreram tombamentos laterais com inclinações-limite menores, comparados com os testes 12 e 12.1, apesar de estarem com mesmo ângulo de posicionamento (φ); no entanto, nos dois primeiros testes a força centrífuga contribuiu para aumentar o ângulo-limite de tombamento, e, nos testes 13 e 13.1, esta força afetou o ângulo-limite de tombamento, diminuindo o limite.

Feita uma análise geral sobre as operações com o trator, simuladas nos testes apresentados no Quadro 7, verificou-se que a posição (φ) do trator simulado que apresentou menor estabilidade para tombamento lateral foi quando este descia por uma diagonal em uma pista inclinada (testes 9,10 e 11, $\varphi=135^\circ$) e não em curva de nível ($\varphi=90^\circ$), como se esperava inicialmente. Uma condição de operação de menor estabilidade, citada anteriormente, seria quando o trator trafega por uma pista inclinada para esquerda e não para direita, como feito até então, pois o centro de gravidade do trator testado está deslocado transversalmente para esquerda em 0,024 metro. A fim de representar estas condições de menor estabilidade, foram simulados os testes 14, 14.1 e 14.2. No teste 14, o ângulo de posição (φ) igual a 60°, foi aquele em que se obteve o menor limite de estabilidade para tombamento lateral sendo o ângulo-limite da pista de -29,9°. No teste 14.1, em que, ao descer em linha reta por uma diagonal na pista inclinada, se inicia uma curva para direita a 1,5 m.s⁻¹, o ângulo-limite caiu para -28,1°, e, no teste 14.2, aumentando a velocidade para 3,0 m.s⁻¹, em uma curva também para direita, o limite diminuiu para -22,02°. As condições simuladas nestes testes foram aquelas em que se obtiveram menores ângulos-limite de tombamentos laterais, comparados com os mesmos raio de curva e velocidades simulados no Quadro 7.

Quadro 8 - Simulações realizadas para determinar os limites dos ângulos de estabilidade pela modificação dos dados de entrada referentes às medidas geométricas e ponderais do trator (bitolas traseira e frontal, localização do cgp e cgf). Em cada variação, mantiveram-se os outros dados de entrada em uma condição-padrão (1), para melhor comparação do efeito destas variáveis

Nº	Bitola $B_t=B_f$	Localização vertical do cgp, Z_{cgp} (m)	Localização vertical do cgf, Z_{cgf} (m)	Localização longit. do cgp, X_{cgp} (m)	Localização longit. do cgf, X_{cgf} (m)	Localização transver. do cgp, Y_{cgp} (m)	Distância entre eixos XL(m)	Ângulo de inclin. e lado tombamento (graus)
1	1,44	0,945	0,46	0,706	2,02	- 0,024	1,95	36,9 - direito 41,3 - p/trás
2	1,87	0,945	0,46	0,706	2,02	- 0,024	1,95	41,2 - p/trás 43,6 - direito
3*	1,44	0,66	0,32	0,706	2,02	- 0,024	1,95	48,2 - $R_{fe}<0$ 51,1 - p/trás
4*	1,44	0,66	0,32	0,706	2,02	- 0,024	1,95	47,5 - direito 51,6 - p/trás
5	1,44	0,945	0,46	0,49	2,02	- 0,024	1,95	33,2 - p/ trás 37,9 - direito
6	1,44	0,945	0,46	0,706	2,02	+0,024	1,95	34,4 - direito 41,3 - p/trás
7	1,44	0,945	0,46	0,49	1,41	-0.024	1,37	31,4 - p/trás 37,1 - direito

- Nas simulações, o limite de estabilidade foi determinado aumentando-se a inclinação da pista para direita até o tombamento, para o trator posicionado em curva de nível($\varphi=90^\circ$) ou em acive($\varphi=0^\circ$), destacando primeiro o que ocorreu com menor ângulo.
- Condição-padrão: $\delta=0$ (pneus frontais em linha reta); $V = 0 \text{ m.s}^{-1}$; $cn = 80$; $P_{fe} = P_{fd} = 165 \text{ kPa}$, $P_{td} = P_{te} = 83 \text{ kPa}$; as outras medidas foram as mesmas do trator estudado (item 4.1 – dados do trator).
- Simulação 3* e 4* - reduziu-se também a posição da altura do mancal de 0,63 (m) para 0,44(m), no teste 4*, diferenciando do padrão, pois na simulação 3*, em que não houve redução, ocorreu reação negativa primeiramente no pneu frontal esquerdo ($R_{fe}<0$).
- Nos resultados acima, a instabilidade se deu por tombamento lateral ou longitudinal; não foi avaliada a instabilidade por deslizamento, pois em todos os testes ocorreria deslizamento antes, com ângulo de inclinação pouco menor do que o de tombamento.

No Quadro 8 encontram-se as variáveis de entrada de dados no programa, referentes a algumas das medidas do trator que afetam sua estabilidade. Vê-se que a bitola traseira pode ser aumentada em 30%, simulação 1 (1,44) para 2 (1,87), e que o ângulo da pista para estabilidade de tombamento lateral aumentou em 20% (36,9° para 43,6°). A modificação da variável localização do centro de gravidade, na coordenada vertical do trator, aumentou o ângulo de estabilidade em 28,7% (36,9° para 47,5°) - simulação 4 - quando se diminuiu a sua cota e a altura do mancal em 30%, pois, na simulação 3, quando não se diminui a cota vertical do mancal (Z_m), simultaneamente com a cota vertical do cgp (Z_{cgp}), ocorre reação negativa primeiramente no rodado frontal esquerdo e, em seguida, no rodado traseiro esquerdo, que é uma provável situação de instabilidade por dirigibilidade, antes do tombamento. Já a modificação do centro de gravidade no sentido longitudinal (X_{cgp}) - simulação 5 -, recuando-o para trás em 30%, praticamente não aumentou o limite de estabilidade lateral (36,9° para 34,4°). No entanto, em um tombamento para trás, ou seja, numa situação em que o trator estivesse subindo ($\varphi=0^\circ$) por uma pista inclinada, o limite de estabilidade longitudinal passaria de 41,3° para 33,2°.

A variável que representa a localização transversal do centro de gravidade (Y_{cgp}) está geralmente localizada bem próximo do plano médio, na direção longitudinal do trator, pois, quanto mais central sua posição, mais ele terá estabilidade lateral igual, independentemente do lado do tombamento. Na simulação 6, Quadro 8, caso esta variável seja deslocada da linha média do trator para o lado do tombamento em +0,024 m, em vez do valor-padrão de -0,024 m, a estabilidade lateral será reduzida de 36,9° para 34,4°. Na simulação 7, em que o trator apresenta redução de 30% no seu comprimento, as variáveis distância entre os eixos (X_L) e localização longitudinal (X_{cgp} , X_{cgt}) foram reduzidas, a fim de tentar representar essa condição; verificou-se que, para estabilidade lateral, o aumento foi mínimo, de 36,9° para 37,1°, enquanto para estabilidade longitudinal houve redução de 25% (41,3° para 31,4°). As medidas de bitola traseira e a localização do centro de gravidade no sentido vertical foram as que mais afetaram a estabilidade lateral dos tratores. A bitola dos tratores é facilmente modificada; para diminuir a altura do centro de gravidade, pode-se rearranjar a distribuição da massa do trator de maneira que

possa ficar o mais próximo possível do solo. O programa computacional pode facilitar, para os fabricantes ou operadores de tratores, a determinação da maior ou menor estabilidade, pela modificação das medidas do trator. Verificou-se também que apesar das medidas do trator podem aumentar a sua estabilidade; no entanto, a força de aderência dos pneus deve ser também melhorada, pois as equações empíricas utilizadas no programa computacional para prever a força de aderência dos pneus mostraram que, em quase todas as simulações, o trator deslizava os rodados do lado do tombamento ou perdia a dirigibilidade dos pneus frontais com ângulos inferiores aos limites de estabilidade por tombamento.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivos desenvolver um modelo matemático para previsão da perda da estabilidade de trator agrícola, sem implemento acoplado, sob condição dinâmica, e fazer sua verificação em uma pista padronizada.

Na primeira etapa do trabalho desenvolveu-se um modelo matemático implementado em um programa computacional, para previsão da perda da estabilidade do trator agrícola, em função das medidas geométricas e ponderais e da condição em que se encontrava o trator na pista. Na verificação experimental do modelo, foram dimensionadas e construídas uma pista para testes de tombamentos laterais e uma estrutura para proteção do trator contra tombamentos. Utilizou-se um trator 4x2, de tamanho real, para realização dos testes experimentais. Com base nos resultados obtidos na comparação dos ângulos-limite de estabilidade para tombamentos laterais dos valores simulados e experimentais, pode-se concluir que:

- O modelo computacional desenvolvido é capaz de prever a perda da estabilidade de tratores 4x2, sem implemento acoplado, com margem de erro médio de 5,5% entre os valores simulados e os experimentais.
- O segundo estágio do tombamento sempre ocorreu nos testes realizados experimentalmente, partindo do fato de que a energia adquirida pelo chassi (massa parcial) no primeiro estágio do tombamento é capaz de dar continuidade a este, quando o chassi colide com o eixo frontal.

Na outra etapa do trabalho, foram realizadas simulações para estudo do comportamento do trator em situações diferentes das usadas para verificação do modelo. Tendo em vista os resultados obtidos pelas simulações, chegou-se as seguintes conclusões:

- Nas simulações em que se variaram as posições do trator sobre uma pista inclinada, verificou-se que o ângulo de posição (φ) igual a 60° foi o que apresentou menor estabilidade para tombamento lateral, o que corresponde ao fato de o trator descer por uma diagonal em uma pista inclinada para esquerda, e não trafegar em curva de nível ($\varphi=90^\circ$), como se esperava inicialmente.
- Nas simulações em que se variaram as medidas geométricas e ponderais do trator, a bitola e a localização do centro de gravidade na coordenada vertical foram os fatores que mais afetaram a estabilidade para tombamento lateral do trator. Já a localização do centro de gravidade na coordenada longitudinal e a distância entre eixos afetaram a estabilidade do trator em tombamentos para trás.
- As equações empíricas utilizadas no programa computacional para prever a força de aderência dos pneus mostraram que, em quase todas as simulações, o trator deslizava os rodados do lado do tombamento ou perdia a dirigibilidade dos pneus frontais com ângulos inferiores aos limites de estabilidade por tombamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. **Agricultural machinery management data**. St. Joseph, MI: 1990. p.285-291. (ASAE Standard, D497). 717p.
- ASHBURNER, J. E., SIMS, B. G. **Elementos de diseño del tractor herramientas de labranza**. Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1984. 474p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10001**; estrutura de proteção contra capotagem para tratores agrícolas de rodas, método de ensaio. Rio de Janeiro: 1987. 23p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12567**; trator agrícola - Determinação do centro de gravidade, método de ensaio. Rio de Janeiro: 1992. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 1000**; estrutura de proteção contra capotagem para tratores agrícolas de rodas, especificação. Rio de Janeiro: 1987. 9p.
- BARGER, E. L., LILJEDAHN, J. B., CARLETON, W. M., MCKIBBEN, E.G. **Tratores e seus motores**. Rio de Janeiro: Edgar Blucher, 1966. 398p.
- BATSCHLET, E. D. **Introdução à matemática para biocientistas**. Zurique: Instituto de Matemática da Universidade de Zurique; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978. 495p.
- BROW, D.K. **An introduction to the finite element method using basic programs**. New York: Surrey University Press, 1984. p.1-5.

- CATANEO, A. **Análise comparativa de parâmetros de tratores agrícolas de rodas nacionais**. Botucatu: UNESP, 1988. 144p. Dissertação (Mestrado em...) – Universidade Estadual Paulista, 1998.
- CHUDAKOV, D.A. **Fundamentos de la teoria y el cálculo de tractores y automóviles**. Moscou: Mir, 1977. 434p.
- DELGADO, L. M. **El tractor agrícola características y utilización**. Secretaria General de Estructuras Agrarias; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1991. 235p.
- DIAS, G. P., LIMA, J. S. S., ESCOBEDO, J. F., DANTAS A. A. A. Estabilidade lateral de tratores agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, Ilhéus, BA. **Anais...** Ilhéus: [s.n.], 1993a. p.1838-1846.
- DIAS, G. P., LIMA, J. S.S., FREITAS, M.C. Constantes elásticas de pneus de tratores agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus, BA. **Anais...** Ilhéus: [s.n.], 1993b. p.1847-1854
- DU PLESSIS, H. L. M., VENTER, G. Soft surface lateral forces and force modeling for a tractor tire. **Journal of terramechanics**, v.30, n.2, p.101-110, 1993.
- FENSTER, S. K., UGURAL, A. C., **Advance strength and applied elasticity**. New Jersey, EUA: Prentice – Hall do Brasil, 1987. 469p.
- FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA - FUNDACENTRO. **Manual de segurança, higiene e medicina do trabalhador rural**. São Paulo: 1978. 185p.
- FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA - FUNDACENTRO. **Manual de segurança, higiene e medicina do trabalhador rural**. São Paulo: 1979. 84p.
- FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA - FUNDACENTRO. In: CONGRESSO MUNDIAL SOBRE SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO, 15, 1999, São Paulo. **XV Congresso ...**, 1999. (<http://www.fundacentro.gov.br/f-not.html>).
- GREEN, R.M. **Spherical astronomy**. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 431p.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER J. **Fundamentos de física**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996. v.1, 329p.

- INOUE, G. H., **Estudo das forças nos pneus de tratores agrícolas visando avaliar a estabilidade lateral**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 61p. Dissertação (Mestrado em...) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- KIM, K.U., REHKUGLER, G. E. A review of tractor dynamics and stability. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.3, p.615-623, 1987.
- LARSON, D. L., SMITH, D. W., LILJEDAHL, J. B. The dynamics and stability of three- dimensional tractor motion. **Transactions of the ASAE**, v.19, n.1, p.195-200, 1976.
- LILJEDAHL, J.N., SMITH, W.D., TURQUIST, P.K. e HOKI, M. **Tractor and their power units**. 4. ed. New York: Avi Books, 1989.463p.
- McMULLAN, T. A. G., PLACZETT, C. W., PEACHEY, R. O. The behavior of tractor drive tyres at low inflation pressures when reacting high side forces. **Journal of Agricultural Engineering Research.**, v.39, p.221-229, 1988.
- MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**, São Paulo: EPU; USP, 1980. v.2. 367p.
- MURPHY, D.J. **Evaluation of the agricultural safety and health best management practices manual (hazard reduction, best management)**. The Pennsylvania State University, 1999. (<http://wwwlib.umi.com/dissertations/fullcit?p9940892>).
- REHKUGLER, G.E. Tractor steering dynamics – simulated and measured. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.2, p.1515-1519, 1982.
- REHKUGLER, G.E., KUMAR, V., DAVIS, D.C. simulation of tractor accidents and overturns. **Transactions of the ASAE**, v30, n.3, p.601-604, 1976.
- ROBIN, P. **Segurança e ergonomia em maquinaria agrícola**. São Paulo: FUNDACENTRO, 1987. 24p.
- SCHWAB C. V., HANNA M., MILLER L. **Use tractors with ROPS to save lives**, [15/12/1999], (<http://www.ae.iastate.edu/safety/pm1265d.txt>).
- ZUCHI P. S., LEAL, M. C. P., OLIVEIRA, J. C. Levantamento dos acidentes do trabalho rural ocorridos e registrado pelo FUNRURAL em vinte e sete municípios mineiros, no ano de 1977. In: CONGRESSO NACIONAL DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES DE TRABALHO, 1982, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo: 1982. p.152-164.

APÉNDICES

APÊNDICE A

Listagem do programa escrito na linguagem Visual Basic, utilizado no cálculo do limite de estabilidade.

```
'ESTABILIDADE LATERAL DE TRATORES 4x2
'AUTOR JOSEPH KALIL KHOURY JUNIOR

Dim CC(10, 10), TT(10) As Single

Private Sub Command1_Click()
'Dimensionando variáveis

Dim C(2, 2) As Single 'dimensionamento das matrizes utilizadas para resolver os sistemas
Dim T(2) As Single 'de duas equações e duas incógnitas
Dim RR(2)

Const Pi = 3.141592654
Const g = 9.82, Nn = 2

'ENTRADA DE DADOS

'DADOS DO TRATOR

'Massa do trator
Mtf = Val(Text3.Text)
Mf = Val(Text4.Text)
Mp = Mtf - Mf

'Bitola padrão
Bto = Val(Text5.Text)
Bf = Val(Text32.Text)

'Largura Pneu
Lp = Val(Text26.Text)

'Bitola para cálculo da estabilidade, acrescido a largura do pneu traseiro
Bt = Bto + (Lp * 0.0254)

'Localização do cgt
Ycgt = Val(Text6.Text) 'coordena transversal de um plano passando pelo eixo médio longitudinal
Zcgt = Val(Text7.Text) 'coordenada vertical de um plano passando no apoio dos rodados
Xcgt = Val(Text8.Text) 'coordenada longitudinal de um plano passando pelo eixo traseiro
Ycgtd = (Bt / 2) - Ycgt 'distância transversal do cgt à lateral direita do trator entre os rodados
YcgtAB = (Bto / 2) - Ycgt 'distância transversal do cgt à lateral direita do trator para o cálculo
segundo ASBURNER e SIMS

'Localização do cgp
Ycgp = Val(Text9.Text)
Zcgp = Val(Text10.Text)
Xcgp = Val(Text11.Text)
Ycgpd = (Bt / 2) - Ycgp 'distância transversal do cgp à lateral direita do trator

'Localização do cgf
Zcgf = Val(Text33.Text)
Ycgf = Val(Text34.Text)
Xcgf = Val(Text2.Text)

'Altura do mancal(Zm) e a distância entre eixos(XL)
Zm = Val(Text12.Text)
XL = Val(Text13.Text)
```

```

'Velocidade deslocamento do trator
V = Val(Text24.Text)

'ângulo de posição do trator na pista
f1 = Val(Text25.Text)
f = f1 * Pi / 180

'Dados da barra de tração
P = Val(Text28.Text) 'força na barra de tração
zp = Val(Text29.Text) 'altura da barra de tração
xp = Val(Text30.Text) 'distância horizontal do eixo traseiro ao ponto de fixação da barra de tração
'ângulo inclinação da barra tração em relação ao eixo longitudinal do trator; (+)ant-hor; (-)horário
ap1 = Val(Text1.Text)
ap = ap1 * Pi / 180

'valor adimensional do solo, para cálculo da resistência ao rolamento
cnf = Val(Text31.Text)

'DADOS DA PISTA

'Angulo de inclinação e raio da pista em que se encontra o trator
a1 = Val(Text14.Text) 'ângulo de inclinação em graus da pista
r1 = Val(Text15.Text) 'raio de curvatura = distância ao centro da curva até o eixo traseiro
aesterg = Val(Text27.Text) 'ângulo de esterçamento das rodas guias, em graus
aester = aesterg * Pi / 180 'ângulo de esterçamento das rodas guias, em radianos

'Rotina para evitar entrada de dados do ângulo de esterçamento dos pneus frontais com valor zero
If Val(Text15.Text) = 0 And Val(Text27.Text) = 0 Then
    MsgBox ("Entre com o valor do Raio de Giro mínimo do trator ou ângulo de esterçamento"),,
    "Erro na Entrada de Dados"
    Text15.SetFocus
    Text15.SelStart = 0
    Text15.SelLength = Len(Text15)
End If

'opção de entrada de dados para determinar o raio de curvatura
If r1 = 0 And aester <> 0 Then
    r1 = (XL / aester)
End If
aester = XL / r1
aestergr = aester * 180 / Pi

'entrada de dados da pressão de enchimento e altura das garras pneus
Pfd = Val(Text16.Text)
Pfe = Val(Text17.Text)
Ptd = Val(Text18.Text)
Pte = Val(Text19.Text)
Gfd = Val(Text23.Text)
Gfe = Val(Text22.Text)
Gtd = Val(Text21.Text)
Gte = Val(Text20.Text)

Open "Result.stb" For Output As #1

'Inicio de cálculos

qf = ((1.2 / cnf) + 0.04) 'calculo do termo que determina a resistência ao rolamento
Fcp = Mp * V ^ 2 / r1 'cálculo da força centrífuga atuando no cgp
Fcf = Mf * V ^ 2 / r1 'cálculo da força centrífuga atuando no cgf
a11 = a1 * Pi / 180 'cálculo do ângulo de inclinação da pista em radianos
n = 0 ' inicio do contador de iterações
a11fix = a11 'ângulo da pista testado
a11fixgr = a11fix * 180 / Pi 'ângulo da pista testado. em graus

```

```

'ângulo de inclinação lateral do chassi em função de f, para cálculo de Fc
fa = Sin(a11) * Sin(f) 'variável auxiliar 1, para cálculo do ângulo de inclinação do chassi
arcsenfa = Atn(fa / Sqr(-fa * fa + 1)) 'variável auxiliar 2, para cálculo do ângulo de inclinação do
chassi
a12 = arcsenfa 'ângulo de inclinação do chassi em rad
a12gr = a12 * 180 / Pi 'ângulo de inclinação do chassi em graus

'ângulo de inclinação do chassi para ser acrescentado a inclinação devido as deformações dos
pneus para cada iteração.
a12fix = a12
a12fixgr = a12fix * 180 / Pi

' rotina para executar 10 iterações, onde será somado a cada uma, a inclinação.aumentada
devido a deformações dos pneus

Do Until n = 10
n = n + 1

'cálculo das reações dos pneus

fa = Sin(a11) * Sin(f)
arcsenfa = Atn(fa / Sqr(-fa * fa + 1)) '
a12 = arcsenfa 'ângulo de inclin. lateral do chassi em função de f, para cálculo de Fc
a12gr = a12 * 180 / Pi

'Início dos cálculo das reações, através do balanço das forças e momentos atuando no trator
'para condição em que se encontra o mesmo.

'somatório Mz=0 na massa parcial, e considerando que o diferencial das rodas traseiras faz com
'que as forças de tração e resistência ao rolamento das rodas direita e esquerda sejam iguais:

Lm = (Xcgp / XL) * (Mp * g * Sin(a11) * Sin(f) + Fcp * Cos(a12)) - ((Ycgp - Bt / 2) / XL) * Mp * g *
Sin(a11) * Cos(f)

'Depois de encontrado Lm temos:'

''' Primeiro sistema 2x2'''
'(XL)* Rm + (Zm)* Tm = T(1) termo independente do somatório MY, na massa parcial
'[(+q*cos(aestercam))+qf*tan(aestercam)*sen(aestercam)]*Rm + (-1)* Tm = T(2) ,somatório das
FX no eixo frontal

'implementando o sistema(1) acima no programa computacional

C(1, 1) = XL
C(1, 2) = Zm
C(2, 1) = qf * Cos(aester) + qf * Tan(aester) * Sin(aester)
C(2, 2) = -1

T(1) = -Mp * g * Sin(a11) * Cos(f) * Zcgp + Mp * g * Cos(a11) * Xcgp - Fcp * Sin(a12) * Xcgp - P *
Cos(ap) * zp - P * Sin(ap) * xp
T(2) = -qf * Mf * g * Cos(a11) * Cos(aester) + qf * Fcf * Sin(a12) * Cos(aester) - Fcf * Cos(a12) *
Tan(aester) - (Mf * g * Sin(a11) * Sin(f)) * Tan(aester) - Lm * Tan(aester) - Mf * g * Sin(a11) *
Cos(f) + Fcf * Sin(a12) * Tan(aester) * Sin(aester) * qf - qf * Mf * g * Cos(a11) * Tan(aester) *
Sin(aester)

'transfere os dados de C para A
For i = 1 To Nn
For j = 1 To Nn
CC(i, j) = C(i, j)
Next j
Next i
'transfere os dados de T para B
For i = 1 To Nn
TT(i) = T(i)
Next i

'chama rotina para resolver o sistema linear criado

```

Call Linear(RR(), Nn)
'elementos da matriz de variáveis

Rm = RR(1)
Tm = RR(2)

'''' Segundo sistema 2x2''''
'Rtd*(-Bt/2) + Rte*(Bt/2) = (Zm)*Lm + T(1), somatório MX=0 na massa parcial
'Rtd*(1) + Rte*(1) = -Rm + T(2), somatório Fz=0 na massa parcial

'implementando o sistema(2) acima no programa computacional

C(1, 1) = -Bt / 2
C(1, 2) = Bt / 2
C(2, 1) = 1
C(2, 2) = 1
T(1) = (Zm) * Lm - Mp * g * Sin(a11) * Sin(f) * Zcgp - Fcp * Cos(a12) * Zcgp + Mp * g * Cos(a11) *
(Ycgpd - Bt / 2) - Fcp * Sin(a12) * (Ycgpd - Bt / 2)
T(2) = -Rm + Mp * g * Cos(a11) - Fcp * Sin(a12) + P * Sin(ap)

'transfere os dados de C para A
For i = 1 To Nn
For j = 1 To Nn
CC(i, j) = C(i, j)
Next j
Next i

'transfere os dados de T para B
For i = 1 To Nn
TT(i) = T(i)
Next i

'chama rotina para resolver o sistema linear criado
Call Linear(RR(), Nn)
'elementos da matriz de variáveis

Rtd = RR(1)
Rte = RR(2)

'Fazendo o somatório FY=0 na massa parcial, temos a soma das forças laterais atuando
'no eixo traseiro:
'Ltd + Lte = -Lm + T(1).

'implementando a equação acima no programa computacional
somaLateraltr = -Lm + Mp * g * Sin(a11) * Sin(f) + Fcp * Cos(a12)

'Fazendo o somatório Fz=0 na massa parcial, temos a soma das forças verticais atuando
'no eixo traseiro:

'implementando a equação acima no programa computacional
somaVerticaltr = Rtd + Rte

'pode-se considerar que o coeficiente angular(KLt), que determina a razão entre a Ltd/Rtd é igual
Lte/Rte, então (Ltd+Lte) / (Rtd+Rte) = KLt.

'implementando a equação acima no programa computacional
KLt = somaLateraltr / somaVerticaltr

'como conhecemos KLt, Rte e Rtd temos as forças laterais nos pneus traseiros
Lte = KLt * Rte
Ltd = KLt * Rtd

'Para calcularmos as forças atuando no eixo frontal, foi feito também o balanço de forças e
momentos neste:

'somatório MX no eixo frontal
'Rtd*(Bt/2)+Rfe*(-Bf/2)= Lm*Zm + Mf*g*sin(a11)*sin(f)*Zcgf+Fcf*cos(a11)*

'somatório Fz no eixo frontal

$$Rfd(1) + Rfe(1) = Mf * g * \cos(a11) + Rm - Fcf * \sin(a11)$$

'a partir destas duas equações acima temos o terceiro sistema para cálculo das reações verticais nos pneus frontais do trator

'''Terceiro Sistema de 2 equações

'implementando o sistema(3) acima no programa computacional

$$C(1, 1) = Bf / 2$$

$$C(1, 2) = -Bf / 2$$

$$C(2, 1) = 1$$

$$C(2, 2) = 1$$

$$T(1) = Lm * Zm + Mf * g * \sin(a11) * \sin(f) * Zcgf + Fcf * \cos(a12) * Zcgf$$

$$T(2) = Mf * g * \cos(a11) + Rm - Fcf * \sin(a12)$$

'transfere os dados de C para A

For i = 1 To Nn

For j = 1 To Nn

$$CC(i, j) = C(i, j)$$

Next j

Next i

' transfere os dados de T para B

For i = 1 To Nn

$$TT(i) = T(i)$$

Next i

'chama rotina para resolver o sistema linear criado

Call Linear(RR(), Nn)

'elementos da matriz de variáveis

$$Rfd = RR(1)$$

$$Rfe = RR(2)$$

'fazendo o somatório FY no eixo frontal obtém-se o total forças laterais

$$\text{somaLateralf} = Lm / \cos(aester) + Mf * g * \sin(a11) * \sin(f) / \cos(aester) + (Fcf * \cos(a12) / \cos(aester)) + qf * (Rfe + Rfd) * \tan(aester)$$

'fazendo o somatório Fy no eixo frontal obtém-se o total forças laterais

$$\text{somaVerticalf} = Rfd + Rfe$$

'pode-se considerar para o eixo frontal, assim como já feito no eixo traseiro, para o coeficiente 'angular(KLf), que $Lfd/Rfd = Lfe/Rfd = KLf$ então $(Lfd+Lfe)/(Rfd+Rfe) = KLf$ então:

$$KLf = \text{somaLateralf} / \text{somaVerticalf}$$

'Assim temos as forças laterais atuando nos pneus frontais

$$Lfe = KLf * Rfe$$

$$Lfd = KLf * Rfd$$

'equações empíricas utilizadas para cálculo das constantes de rigidez elásticas(N/mm) verticais e laterais dos pneus, obtidas em testes para pista asfáltica com pressões de enchimento de pneus traseiros($P_t = 95$ a 140) e pneus frontais ($P_f = 165$ a 385) em kPa, e aplicadas nestes forças verticais, nos pneus traseiros ($R_{vt} = 1310$ a 1615) e, pneus frontais ($R_{vf} = 500$ a 870) em N, e alturas de garras de garras para pneus frontais ($G_f = 23$) e, pneus traseiros ($G_t = 29$) em mm 'obs.: na K_{vt} , foi feito um ajuste multiplicando-se por 0,33,;

$$Kvfe = 70.82 + 0.6132 * Pfe$$

$$Kvfd = 70.82 + 0.6132 * Pfd$$

$$Kvte = (105 + 1.6454 * Pte) * 0.33$$

$$Kvtd = (105 + 1.6454 * Ptd) * 0.33$$

$$Klfe = 43 + 4.2911 * Gfe + 0.5667 * Pfe - 0.2449 * Gfe ^ 2$$

$$Klfd = 43 + 4.2911 * Gfd + 0.5667 * Pfd - 0.2449 * Gfd ^ 2$$

$$Klte = 146 - 0.0056 * Rte + 1.8432 * Pte - 0.0346 * Gte * Pte$$

$$Kltd = 146 - 0.0056 * Rtd + 1.8432 * Ptd - 0.0346 * Gtd * Ptd$$

'cálculo das deformações verticais e laterais dos pneus em função da reação vertical aplicada nos pneus .

$$Dvfe = Rfe / Kvfe$$

$$Dvfd = Rfd / Kvfd$$

$$Dvte = Rte / Kvte$$

$$Dvtd = Rtd / Kvtd$$

$$DLfe = Lfe / Klfe$$

$$DLfd = Lfd / Klfd$$

$$DLte = Lte / Klte$$

$$DLtd = Ltd / Kltd$$

'ângulo de inclinação a ser somado no ângulo .inclinação lateral do chassi devido as deformações resultantes nos pneus

$$DLT = (DLtd - DLte) / 1000 \quad \text{'deformação lateral resultante em m}$$

$$Dvt = ((Dvtd - Dvte) / 1000) \quad \text{'deformação vertical resultante em m}$$

'variáveis auxiliares para cálculo do ângulo de inclinação lateral, devido aos pneus

$$Y = (Dvt / (Bt - DLT))$$

$$\arcsen Y = \text{Atn}(Y / \text{Sqr}(-Y * Y + 1))$$

'ângulo inclinação lateral, devido deformações dos pneus em graus

$$adeforma = \arcsen Y * 180 / \text{Pi}$$

'ângulo de inclinação lateral do chassi após somado o ângulo. Inclinação. lateral, devido as deformações dos pneus

$$achassipos = a12fix + \arcsen Y \quad \text{'a12fix é o âng. Inclín. lateral do chassi sem deformação}$$

'ângulo de inclinação lateral do chassi após somado as deformações dos pneus em graus

$$achassiposgr = 180 * achassipos / \text{Pi}$$

'rotina para cálculo da inclinação lateral do chassi quando o trator posicionado em $f = 0^\circ$ ou 180°

'quando f é igual a 0° ou 180° o termo $xx = [\text{Sin}(achassipos) / (\text{Sin}(f))]$ utilizados nas equações,

tende para: $xx = \sin(a11) * [\text{sin}(f)/\text{sin}(f)] = \sin(a11)$

'implementando ao programa computacional temos:

If $f = 0$ Or $f = \text{Pi}$ Then

xx = $\text{Sin}(a11)$

GoTo kalil1:

End If

'xx será o termo utilizado para calcular o ângulo da pista correspondente ao ângulo de inclinação do chassi após deformação, quando não estiver na condição $f=0$ ou 180 , então $a11 = \arccos(xx)$

$$xx = (\text{Sin}(achassipos)) / (\text{Sin}(f))$$

kalil1:

'ângulo de inclinação da pista que corresponde ao ângulo .de inclin. lateral do chassi após deformação dos 'pneus

$$a11 = \text{Atn}(xx / \text{Sqr}(-xx * xx + 1)) \quad \text{'equação do visual basic para calcular arcsen}(xx)$$

$$a11gr = a11 * 180 / \text{Pi}$$

Loop

"Cálculo para decompor as reações verticais dos pneus quando este estiver apoiados de um lado em pista inclinada e do outro em uma pista plana

$$Rfdnível = Rfd * \text{Cos}(achassipos) + Lfd * \text{Sin}(achassipos)$$

$$Rtdnível = Rtd * \text{Cos}(achassipos) + Ltd * \text{Sin}(achassipos)$$

'Cálculo das Forças de aderência laterais dos pneus em pista de mesma inclinação, através de equações empíricas citadas no texto:

Fafd = 881 + 158 * Gfd + 0.00003 * Rfd ^ 2 - 3.33 * Gfd ^ 2 + 0.0182 * Pfd ^ 2 - 0.4908 * Gfd * Pfd
Fafe = 881 + 158 * Gfe + 0.00003 * Rfe ^ 2 - 3.33 * Gfe ^ 2 + 0.0182 * Pfe ^ 2 - 0.4908 * Gfe * Pfe
Fatd = 1444 + 0.7274 * Rtd - 0.0023 * Ptd * Rtd
Fate = 1444 + 0.7274 * Rte - 0.0023 * Pte * Rte

'Cálculo das forças de aderência laterais dos pneus quando apoiados de um lado em pista inclinada e do outro em uma pista plana:

Fafdnivel = 881 + 158 * Gfd + 0.00003 * Rfdnivel ^ 2 - 3.33 * Gfd ^ 2 + 0.0182 * Pfd ^ 2 - 0.4908 * Gfd * Pfd
Fatdnivel = 1444 + 0.7274 * Rtdnivel - 0.0023 * Ptd * Rtdnivel

'Cálculo do modulo das reações laterais dos pneus quando apoiados de um lado em pista inclinada e do outro em uma pista plana, para fazer comparação se a força de aderência é capaz de suportar a reação lateral nos pneus.

Lfdnivel = Sqr(((Lfd * Cos(achassipos)) - (Rfd * Sin(achassipos))) ^ 2)
Ltdnivel = Sqr(((Ltd * Cos(achassipos)) - (Rtd * Sin(achassipos))) ^ 2)

'Cálculo do limite de inclinação para tombamentos laterais segundo ASHBURNER e SIMS
'calcula da força centrífuga, segundo ASHBURNER e SIMS
Fc = (Mtf * V ^ 2) / (r1)

'calcula da velocidade máxima permitida para uma declividade da pista em que o trator esta trafegando, segundo ASHBURNER e SIMS

YpAB = ((Bto * (XL - Xcgt)) / (2 * XL)) + (YcgtAB - (Bto / 2))
hpAB = Zcgt - (Zm * Xcgt) / XL
'ângulo estático máximo
aestaticoAB = Atn(YpAB / hpAB)
aestaticoABgr = aestaticoAB * 180 / Pi
VAB1 = ((g * r1 * Sin(aestaticoAB - a11)) / (Sin((Pi / 2) - aestaticoAB)))
'VAB1 variável auxiliar para calculo de VAB

If VAB1 < 0 Then
VAB = "Velocidade negativa e inclinação estática já ultrapassou limite de tombamento lateral"

Else

'Velocidade máxima permitida
VAB = Sqr(VAB1)
End If

'Cálculo da declividade limite segundo MIALHE
aestaticoML = (Atn(Bto * 0.5 / Zcgt)) * 180 / Pi
adinamicoML = aestaticoML * 0.5

'calcula da Bitola efetiva após deformações laterais dos pneus
Befetiva = Bto - (DLtd / 1000) + (DLte / 1000)

"Rotinas que identificam o lado do tombamento ou se condição estável

If Rtd <= 0 And Rte <= 0 Then
Print #1, "=>Tombamento para frente"
Print #1, "=>Reações Verticais nos Pneus"
Print #1, "Rtd=>"; Rtd
Print #1, "Rte=>"; Rte
Print #1, "Rfd=>"; Rfd
Print #1, "Rfe=>"; Rfe
Print #1, "Angulo posição na pista inclinada(º)=====>"; f1
Print #1, "Ângulo deformações dos pneus(º)=====>"; adeforma
Print #1, "Ângulo da Pista testado(º)=====>"; Val(Text14.Text)
Print #1, "Ângulo da Pista correspondente às deformações pneus(º)=>"; a11gr
Print #1, "Ângulo do chassi sem deformações dos pneus(º)=====>"; a12fixgr

```

Print #1, "Ângulo do chassi após deformações dos pneus(°)=====>"; achassiposgr
GoTo Kalil:
Elseif Rte <= 0 Then
Print #1, "=>Tombamento lateral direito"
Print #1, "=>Reções Verticais nos Pneus"
Print #1, "Rtd=>"; Rtd
Print #1, "Rte=>"; Rte
Print #1, "Rfd=>"; Rfd
Print #1, "Rfe=>"; Rfe
Print #1, "Angulo posição na pista inclinada(°)=====>"; f1
Print #1, "Ângulo deformações dos pneus(°)=====>"; adeforma
Print #1, "Ângulo da Pista testado(°)=====>"; Val(Text14.Text)
Print #1, "Ângulo da Pista correspondente às deformações pneus(°)=>"; a11gr
Print #1, "Ângulo do chassi sem deformações dos pneus(°)=====>"; a12fixgr
Print #1, "Ângulo do chassi após deformações dos pneus(°)=====>"; achassiposgr
GoTo Kalil:
Elseif Rtd <= 0 Then
Print #1, "=>Tombamento lateral esquerdo"
Print #1, "=>Reções Verticais nos Pneus"
Print #1, "Rtd=>"; Rtd
Print #1, "Rte=>"; Rte
Print #1, "Rfd=>"; Rfd
Print #1, "Rfe=>"; Rfe
Print #1, "Angulo posição na pista inclinada(°)=====>"; f1
Print #1, "Ângulo deformações dos pneus(°)=====>"; adeforma
Print #1, "Ângulo da Pista testado(°)=====>"; Val(Text14.Text)
Print #1, "Ângulo da Pista correspondente às deformações pneus(°)=>"; a11gr
Print #1, "Ângulo do chassi sem deformações dos pneus(°)=====>"; a12fixgr
Print #1, "Ângulo do chassi após deformações dos pneus(°)=====>"; achassiposgr
GoTo Kalil:
Elseif Rfd <= 0 And Rfe <= 0 Then
Print #1, "=>Tombamento para trás"
Print #1, "=>Reções Verticais nos Pneus"
Print #1, "Rtd=>"; Rtd
Print #1, "Rte=>"; Rte
Print #1, "Rfd=>"; Rfd
Print #1, "Rfe=>"; Rfe
Print #1, "Angulo posição na pista inclinada(°)=====>"; f1
Print #1, "Ângulo deformações dos pneus(°)=====>"; adeforma
Print #1, "Ângulo da Pista testado(°)=====>"; Val(Text14.Text)
Print #1, "Ângulo da Pista correspondente às deformações pneus(°)=>"; a11gr
Print #1, "Ângulo do chassi sem deformações dos pneus(°)=====>"; a12fixgr
Print #1, "Ângulo do chassi após deformações dos pneus(°)=====>"; achassiposgr
GoTo Kalil:
End If
Print #1, "=>Aumentar ângulo de inclinação testado até condição da reação vertical for igual: "
Print #1, " -Dois pneus traseiros simultaneamente for nula ou"
Print #1, " -De um dos pneus traseiro for nula ou"
Print #1, " -Dois pneus frontais simultaneamente for nula "
Print #1, "Rtd=>"; Rtd
Print #1, "Rte=>"; Rte
Print #1, "Rfd=>"; Rfd
Print #1, "Rfe=>"; Rfe
Print #1, "Angulo posição na pista inclinada(°)=====>"; f1
Print #1, "Ângulo deformações dos pneus(°)=====>"; adeforma
Print #1, "Ângulo da Pista testado(°)=====>"; Val(Text14.Text)
Print #1, "Ângulo da Pista correspondente às deformações pneus(°)=>"; a11gr
Print #1, "Ângulo do chassi sem deformações dos pneus(°)=====>"; a12fixgr
Print #1, "Ângulo do chassi após deformações dos pneus(°)=====>"; achassiposgr
GoTo Kalil:

```

```

Kalil:
Print #1, "_____ "
Print #1, "Resultados Detalhados"
Print #1, "_____ "
Print #1, "Entrada de Dados"
Print #1, "_____ "
Print #1, "Raio inicial testado(m)=====>; Val(Text15.Text)
Print #1, "ou Ângulo de esterçamento(º)=====>; aesterg
Print #1, "Angulo posição na pista inclinada(º)=====>; f1
Print #1, "Ângulo deformações dos pneus(º)=====>; adeforma
Print #1, "Ângulo da Pista testado(º)=====>; Val(Text14.Text)
Print #1, "Ângulo da Pista correspondente às deformações pneus(º)=>; a11gr
Print #1, "Ângulo do chassi sem deformações dos pneus(º)=====>; a12fixgr
Print #1, "Ângulo do chassi após deformações dos pneus(º)=====>; achassiposgr
Print #1, "Velocidade do Trator(m/s)=====>; V
Print #1, "_____ "
Print #1, "Massa do trator em (Kg)"
Print #1, "Massa total do trator Mtf=====>; Val(Text3.Text)
Print #1, "Massa do eixo frontal Mf=====>; Val(Text4.Text)
Print #1, "Bitola traseira Bt em (m)=====>; Val(Text5.Text)
Print #1, "_____ "

Print #1, "Localização do cgt em (m)"
Print #1, "Ycgt do plano central do trator,(+)a direita e (-)a esquerda==>; Val(Text6.Text)
Print #1, "Zcgt do plano inferior do trator(+)para cima=====>; Val(Text7.Text)
Print #1, "Xcgt do plano do eixo traseiro do trator(+)para frente=====>; Val(Text8.Text)
Print #1, "_____ "
Print #1, "Localização do cgp em (m)"
Print #1, "Ycgp do plano central do trator,(+)a direita e (-)a esquerda===>; Val(Text9.Text)
Print #1, "Zcgp do plano inferior do trator,(+)para cima=====>;
Val(Text10.Text)
Print #1, "Xcgp do plano do eixo traseiro do trator,(+)para frente=====>; Val(Text11.Text)
Print #1, "_____ "
Print #1, "Localização do cgf em (m)"
Print #1, "Ycgf do plano central do trator,(+)a direita e (-)a esquerda==>; Val(Text33.Text)
Print #1, "Zcgf do plano inferior do trator(+)para cima=====>;
Val(Text34.Text)
Print #1, "Xcgf do plano do eixo traseiro do trator(+)para frente=====>; Val(Text2.Text)
Print #1, "_____ "
Print #1, "Altura do mancal (Zm) ao plano inferior em (m)=====>; Val(Text12.Text)
Print #1, "Distancia entre eixos(traseiro-frontal)(XL) em (m)=====>; Val(Text13.Text)
Print #1, "_____ "
Print #1, "Pressão de enchimento dos pneus(kPa) 1 lbf/pol**2 = 6.89 kPa "
Print #1, "Pfd ==>; Val(Text16.Text)
Print #1, "Pfe ==>; Val(Text17.Text)
Print #1, "Ptd ==>; Val(Text18.Text)
Print #1, "Pte ==>; Val(Text19.Text)
Print #1, "_____ "
Print #1, "Altura das garras dos pneus em (mm)"
Print #1, "Gfd ==>; Val(Text23.Text)
Print #1, "Gfe ==>; Val(Text22.Text)
Print #1, "Gtd ==>; Val(Text21.Text)
Print #1, "Gfe ==>; Val(Text20.Text)

Print #1, "_____ "

Print #1, "-----RESULTADOS DOS CÁLCULOS -----"
Print #1, "_____ "
Print #1, "Reações verticais, laterais e força de aderência em cada pneu em Newtons"
Print #1, "_____ "
Print #1, "Pneu traseiro direito(td)"
Print #1, "_____ "
Print #1, "Reação vertical(td)=====>; Rtd
Print #1, "Reação lateral(td)=====>; Ltd
Print #1, "Força Aderência lateral(td)=====>; Fatd
Print #1, "_____ "

```

```

Print #1, "Pneu traseiro direito nível(tdnível)"
Print #1, "-----"
Print #1, "Reação vertical no nível(tdn)=====>"; Rtdnivel
Print #1, "Reação lateral nível(tdn)=====>", Ltdnivel
Print #1, "Força Aderência lateral no nível(tdn)=>"; Fatdnivel
Print #1, "-----"
Print #1, "-----"
Print #1, "Pneu traseiro esquerdo"
Print #1, "-----"
Print #1, "Reação vertical(te)=====>"; Rte
Print #1, "Reação lateral(te)=====>"; Lte
Print #1, "Força Aderência lateral(te)=>"; Fate
Print #1, "-----"
Print #1, "-----"
Print #1, "Pneu frontal direito"
Print #1, "-----"
Print #1, "Reação vertical(fd)=====>"; Rfd
Print #1, "Reação lateral(fd)=====>"; Lfd
Print #1, "Força Aderência lateral(fd)=====>"; Fafd
Print #1, "-----"
Print #1, "Pneu frontal direito no nível"
Print #1, "Reação vertical no nível(fdn)=====>"; Rfdnivel
Print #1, "Reação lateral no nível(fdn)=====>"; Lfdnivel
Print #1, "Força Aderência lateral no nível(fdn)=>"; Fafdnivel
Print #1, "-----"
Print #1, "Pneu frontal esquerdo"
Print #1, "-----"
Print #1, "Reação vertical(fe)=====>"; Rfe
Print #1, "Reação lateral(fe)=====>"; Lfe
Print #1, "Força Aderência lateral(fe)=>"; Fafe
Print #1, "-----"
Print #1, "-----"
Print #1, "Reações no mancal"
Print #1, "-----"
Print #1, "Reação vertical mancal=====>"; Rm
Print #1, "Reação lateral mancal=====>"; Lm
Print #1, "Reação longitudinal mancal=====>", Tm
Print #1, "-----"
Print #1, "Força Centrífuga Parcial(N)=====>"; Fcp
Print #1, "Força Centrífuga Eixo Frontal(N)=>"; Fcf
Print #1, "Força Centrífuga total(N)=====>"; Fc
Print #1, "-----"
Print #1, "Constantes de rigidez verticais e laterais kN/m"
Print #1, "-----"
Print #1, "Kvfe=>"; Kvfe
Print #1, "Kvfd=>"; Kvfd
Print #1, "Kvte=>"; Kvte
Print #1, "Kvtd=>"; Kvtd
Print #1, "Klfe=>"; Klfe
Print #1, "Klfd=>"; Klfd
Print #1, "Klte=>"; Klte
Print #1, "Kltd=>"; Kltd
Print #1, "-----"
Print #1, "Deformações verticais e laterais dos Pneus mm"
Print #1, "-----"
Print #1, "Dvfe=>"; Dvfe
Print #1, "Dvfd=>"; Dvfd
Print #1, "Dvte=>"; Dvte
Print #1, "Dvtd=>"; Dvtd
Print #1, "Dlfe=>"; DLfe
Print #1, "Dlfd=>"; DLfd
Print #1, "Dlte=>"; DLte
Print #1, "Dltd=>"; DLtd
Print #1, "Bitola efetiva traseira em (m)=>"; Befetiva
Print #1, "-----"

```

```

Close #1
Principal.mnuResultados.Enabled = True
End Sub

```

```

Private Sub Command2_Click()
Me.Hide
End Sub
Private Sub Form_Load()
Dim Esq, Topo As Integer
Esq = (Principal.ScaleWidth - Me.Width) / 2
Topo = (Principal.ScaleHeight - Me.Height) / 2
EntradaInicial.Left = Esq
EntradaInicial.Top = Topo
End Sub

```

'rotinas utilizadas para cálculo dos sistemas de equações utilizados no modelo

```

Sub Linear(RR(), Nn)
**** Método de eliminação de Gauss ***
Const n = 2
Dim A(n, n), B(n) As Double
Dim R(n, n), D(n) As Double
'transfere os dados de C para A
For i% = 1 To Nn
For j% = 1 To Nn
A(i%, j%) = CC(i%, j%)
Next j%
Next i%
'transfere os dados de T para B
For i% = 1 To Nn
B(i%) = TT(i%)
Next i%

```

```

For i% = 1 To n
For j% = 1 To n
R(i%, j%) = A(i%, j%)
Next j%
Next i%
For i% = 1 To n
D(i%) = B(i%)
Next i%
' Loop de estagios
For K% = 1 To n - 1
' Escolher pivo
Pivo = Abs(A(K%, K%))
Ll% = K%
For i% = K% + 1 To n
Max = Abs(A(i%, K%))
If Max > Pivo Then Pivo = Max
Ll% = i%
Next i%
If Pivo < 0.0001 Then GoTo 1030
If Ll% = K% Then GoTo 560
' Trocas de Linhas
For j% = K% To n
EL = A(K%, j%)
A(K%, j%) = A(Ll%, j%)
A(Ll%, j%) = EL
Next j%
EL = B(K%)
B(K%) = B(Ll%)
B(Ll%) = EL
' Efetua Pivoteamento
560:
For i% = K% + 1 To n
If A(i%, K%) = 0 Then GoTo 640

```

```

mult = A(i%, K%) / A(K%, K%)
A(i%, K%) = 0
For j% = K% + 1 To n
A(i%, j%) = A(i%, j%) - mult * A(K%, j%)
Next j%
B(i%) = B(i%) - mult * B(K%)
640:
Next i%
Next K%
' Resolução do sistema linear triangular superior
If Abs(A(n, n)) < 0.0001 Then GoTo 1030
B(n) = B(n) / A(n, n)
For K% = n - 1 To 1 Step -1
soma = 0
For j% = K% + 1 To n
soma = soma + A(K%, j%) * B(j%)
Next j%
B(K%) = (B(K%) - soma) / A(K%, K%)
Next K%

'transferir os resultados de B para R
For i = 1 To Nn
RR(i) = B(i)
Next i

**** calculo do Resíduo ****
Res = 0
For i% = 1 To n
soma = 0
For j% = 1 To n
soma = soma + R(i%, j%) * B(j%)
Next j%
Erro = Abs(D(i%) - soma)
If Erro > Res Then Res = Erro
Next i%
1030:
1060: ' Fim do programa
End Sub

```


APÊNDICE B

Exemplo de utilização do programa computacional (dados do Quadro 7, teste 10).

Entrada de Dados Inicial

Trator 4x2
 Coordenadas do cgt(total, cgp(parcial) e cgf(frontal))
 Ycgt(m)-(+ lado direito e (-) lado esq- -0.022
 Zcgt(m)-Altura----- 0.9114
 Xcgt(m) em relação ao eixo traseiro----- 0.798
 Ycgp(m)-(+ a dir e (-) a esq- -0.024
 Zcgp(m)- Altura----- 0.945
 Xcgp(m) em rel. ao eixo tras- 0.706
 Ycgf(m)-(+ l.dir e (-) l.esq- 0
 Zcgf(m)-Altura----- 0.46
 Xcgf(m)em rel. ao eixo tras. 2.02
 Zm(m)altura mancal----- 0.63

Medidas trator
 Bitola Frontal(m)----- 1.44
 Bitola Traseira (m)----- 1.44
 XL- distância entre eixos(m)- 1.95
 Massa Total do Trator (kg)----- 1984
 Massa eixo front.após retirado do chassi(kg) 139

Barra tração
 Força Barra Tração (N)----- 0
 Altura da BT- Zp (m)----- 0.40
 Distância long.entre BT/eixo tras.Xp(m) 0.30
 Ângulo entre BT/eixo X (gr) ----- 0
 (+)ant.hor. (-)horário-Observ. lado direito

Pista e Velocidade
 Ângulo inclin. pista simulado(+)/p/dir./(-)/p/esq.-observ.traseiro(gr) 24.9
 Raio Curva.(+)/esquerda (-) direita-observador traseiro(m) ou----- 5
 Âng.esterçamento pneu frontal (+)/esquerda./(-)direito-----
 Velocidade- deslocamento Trator(m/s)----- 3
 Ângulo de posição do trator na pista
 0º subindo / 90º em curva nivel / 180º descendo----- 135
 Cn solo - pneu frontal----- 80

Pneus
Altura das garras em mm
 Frontal Direito-Gfd----- 23
 Frontal Esquerdo- Gfe----- 23
 Traseiro Direito- Gtd----- 29
 Traseiro Esquerdo- Gte----- 29
Pressão de enchimento(kPa)-1lbf/in.2= 6.895 kPa**
 Frontal Direito-Pfd----- 165
 Frontal Esquerdo- Pfe----- 165
 Traseiro Direito- Ptd----- 83
 Traseiro Esquerdo- Pte----- 83
 Largura Pneu em polegada(in.)- 14.9

Calcular Fechar

Figura 1B - Entrada de dados do programa computacional

Resultados fornecidos pelo programa computacional:

```
=>Tombamento lateral direito
=>Reções Verticais nos Pneus
Rtd=> 6930,41372389483
Rte=>-2,48891920732514
Rfd=> 6178,78553469922
Rfe=> 2698,75841061328
Angulo posição na pista inclinada(º)=====> 135
Ângulo deformações dos pneus(º)=====> 2,7924328
Ângulo da Pista testado(º)=====> 24,9
Ângulo da Pista correspondente às deformações pneus(º)=> 29,09827672736
Ângulo do chassi sem deformações dos pneus(º)=====> 17,3205490566
Ângulo do chassi após deformações dos pneus(º)=====> 20,1129818629
```

Resultados Detalhados

```
Entrada de Dados
Raio inicial testado(m)=====> 5
ou Ângulo de esterçamento(º)=====> 22,345354007
Angulo posição na pista inclinada(º)=====> 135
```

Ângulo deformações dos pneus(°)=====> 2,79243280625
Ângulo da Pista testado(°)=====> 24,9
Ângulo da Pista correspondente às deformações pneus(°)=> 29,098276727362
Ângulo do chassi sem deformações dos pneus(°)=====> 17,3205490566678
Ângulo do chassi após deformações dos pneus(°)=====> 20,1129818629233
Velocidade do Trator(m/s)=====> 3

Massa do trator em (Kg)
Massa total do trator Mtf=====> 1984
Massa do eixo frontal Mf=====> 139
Bitola traseira Bt em (m)=====> 1,44

Localização do cgt em (m)
Ycgt do plano central do trator,(+)a direita e (-)a esquerda==>-0,022
Zcgt do plano inferior do trator(+)para cima=====> 0,9114
Xcgt do plano do eixo traseiro do trator(+)para frente=====> 0,798

Localização do cgp em (m)
Ycgp do plano central do trator,(+)a direita e (-)a esquerda====>-0,024
Zcgp do plano inferior do trator,(+)para cima=====> 0,945
Xcgp do plano do eixo traseiro do trator,(+)para frente=====> 0,706

Localização do cgf em (m)
Ycgf do plano central do trator,(+)a direita e (-)a esquerda==> 0,46
Zcgf do plano inferior do trator(+)para cima=====> 0
Xcgf do plano do eixo traseiro do trator(+)para frente=====> 2,02

Altura do mancal (Zm) ao plano inferior em (m)=====> 0,63
Distancia entre eixos(traseiro-frontal)(XL) em (m)=====> 1,95

Pressao de enchimento dos pneus(kPa) 1 lbf/pol**2 = 6.89 KPa
Pfd ==> 165
Pfe ==> 165
Ptd ==> 83
Pte ==> 83

Altura das garras dos pneus em (mm)
Gfd ==> 23
Gfe ==> 23
Gtd ==> 29
Gfe ==> 29

-----R E S U L T A D O S D O S C Á L C U L O S -----

Reações verticais, laterais e força de aderência em cada pneu em Newtons

Pneu traseiro direito (td)

Reação vertical(td)=====> 6930,41372389483
Reação lateral(td)=====> 5891,64297300918
Força Aderência lateral(td)=====> 5162,16696286957

Pneu traseiro direito nível(tdnível)

Reação vertical no nível(tdn)=====> 8533,74566394223
Reação lateral nível(tdn)=====> 3149,17072400105
Força Aderência lateral no nível(tdn)=> 6022,35454870501

Pneu traseiro esquerdo

Reação vertical(te)=====>-2,48891920732514
Reação lateral(te)=====>-2,11586550852895
Força Aderência lateral(te)=> 1442,66469484527

Pneu frontal direito

Reação vertical(fd)=====> 6178,78553469922
Reação lateral(fd)=====> 3275,61804679744
Força Aderência lateral(fd)=====> 2531,66072051425

Pneu frontal direito no nível

Reação vertical no nível(fdn)=====> 6928,37556279703
Reação lateral no nível(fdn)=====> 951,144748789733
Força Aderência lateral no nível(fdn)=> 2826,41063817489

Pneu frontal esquerdo

Reação vertical(fe)=====> 2698,75841061328
Reação lateral(fe)=====> 1430,71833519814
Força Aderência lateral(fe)=> 1604,83790876568

Reações no mancal

Reação vertical mancal=====> 7770,20488878716
Reação lateral mancal=====> 3462,71428555983
Reação longitudinal mancal====> 1771,25083329132

Força Centrífuga Parcial(N)=====> 3321
Força Centrífuga Eixo Frontal(N)====> 250,2
Força Centrífuga total(N)=====> 3571,2

Constantes de rigidez verticais e laterais KN/m

Kvfe=> 171,998
Kvfd=> 171,998
Kvte=> 79,717506
Kvtd=> 79,717506
Klfe=> 105,6487
Klfd=> 105,6487
Klte=> 215,717337947561
Kltd=> 176,893083146189

Deformações verticais e Laterais dos Pneus mm

Dvfe=> 15,6906383249415
Dvfd=> 35,9235894295237
Dvte=> -3,12217395176054E-02
Dvtd=> 86,9371618812915
Dlfe=> 13,5422237585331
Dlfd=> 31,0048116711084
Dlte=> -9,80850926800932E-03
Dltd=> 33,3062371248297
Bitola efetiva traseira em (m)====> 1,4066839543659

APÊNDICE C

Tensões e localização dos elementos na estrutura de proteção do trator, fornecidos pelo programa ANSYS.

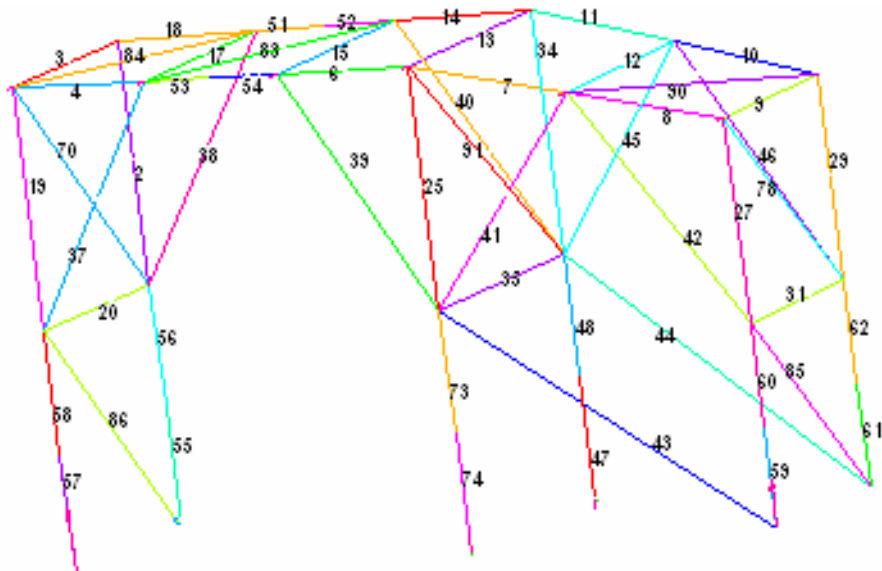


Figura 1C - Estrutura do trator dividida em elementos com seus respectivos números.

Tabela 1C - Número de elementos e suas respectivas tensões em kg.cm⁻²
(multiplicando-se o valor da tabela por 0,098, ter-se-á a tensão em MPa)

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT TABLE LISTING Força lateral direita 13.000kg	PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT TABLE LISTING Força lateral esquerda 13.000kg	PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT TABLE LISTING Força frontal 8.000kg	PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT TABLE LISTING Força traseiro 6.000kg
STAT CURRENT ELEM NMIS89	STAT CURRENT ELEM NMIS89	STAT CURRENT ELEM NMIS89	STAT CURRENT ELEM NMIS89
2 454,13	2 620,59	2 699,61	2 854,76
3 509,51	3 1086,0	3 73,326	3 30,387
4 1152,9	4 1197,5	4 1609,1	4 1143,3
6 1599,0	6 2041,1	6 1508,3	6 1584,2
7 1775,6	7 1895,0	7 1346,2	7 1594,1
8 494,60	8 607,99	8 669,22	8 1956,1
9 1024,1	9 1203,1	9 35,736	9 207,95
10 782,89	10 981,84	10 778,10	10 2068,3
11 1566,5	11 1654,5	11 1306,8	11 1500,9
12 1152,5	12 1829,4	12 51,299	12 116,30
13 1062,0	13 1697,5	13 83,062	13 76,499
14 1457,7	14 1876,7	14 1627,2	14 1679,4
15 638,89	15 644,08	15 85,145	15 124,14
17 1333,9	17 959,66	17 117,99	17 90,607
18 339,55	18 272,38	18 1522,6	18 1000,6
19 1847,2	19 2261,5	19 834,45	19 1029,9
20 2257,7	20 2741,0	20 204,26	20 215,51
25 953,67	25 1069,1	25 240,24	25 223,69
27 1073,4	27 1244,0	27 1121,5	27 1634,0
29 548,40	29 608,58	29 918,67	29 1313,2
31 1470,6	31 1727,4	31 320,10	31 430,60
34 661,90	34 677,48	34 271,96	34 237,99
35 1424,8	35 1642,5	35 55,556	35 67,798
37 873,01	37 1035,6	37 725,98	37 819,26
38 563,48	38 707,03	38 621,35	38 675,58
39 406,46	39 380,47	39 1068,2	39 1223,6
40 352,79	40 303,15	40 1183,0	40 1293,8
41 1027,3	41 1122,8	41 1216,6	41 1882,0
42 597,73	42 713,62	42 1661,2	42 2447,0
43 945,65	43 1056,9	43 947,19	43 1280,7
44 1026,5	44 1135,6	44 974,79	44 1261,8
45 988,06	45 1031,9	45 1183,4	45 1778,2
46 474,64	46 610,80	46 1509,6	46 2181,9
47 3666,9	47 4066,5	47 840,04	47 926,81
48 3146,0	48 3431,0	48 1070,4	48 1222,9
51 945,76	51 1013,6	51 1859,2	51 1551,4
52 1286,2	52 1399,3	52 2465,0	52 2252,6
53 1098,7	53 1305,4	53 1770,3	53 1532,6
54 1506,8	54 1739,3	54 2479,8	54 2366,8
55 2471,4	55 2981,5	55 1840,7	55 2078,6
56 1760,7	56 2098,4	56 1416,4	56 1626,5
57 3219,2	57 3916,2	57 1703,7	57 1992,0
58 2689,7	58 3262,8	58 1206,6	58 1439,3
59 1878,5	59 2180,8	59 2833,3	59 3897,5
60 1479,0	60 1726,1	60 2303,6	60 3119,0
61 1452,6	61 1678,7	61 3075,4	61 4075,4
62 994,53	62 1159,3	62 2686,1	62 3504,5
70 1811,6	70 2188,5	70 266,95	70 310,49
73 2991,6	73 3343,0	73 1039,6	73 1255,4
74 3578,1	74 4007,2	74 825,85	74 973,15
78 1222,7	78 1423,7	78 366,06	78 491,86
83 761,46	83 830,20	83 356,35	83 392,42
84 1127,9	84 1326,4	84 225,28	84 238,35
85 1177,5	85 1368,0	85 1113,4	85 1569,2
86 1948,7	86 2367,3	86 727,67	86 835,82
90 1312,9	90 1484,8	90 224,18	90 369,98
91 1067,1	91 1220,7	91 56,557	91 80,663
MINIMUM VALUES ELEM 18 VALUE 339,55	MINIMUM VALUES ELEM 18 VALUE 272,38	MINIMUM VALUES ELEM 9 VALUE 35,736	MINIMUM VALUES ELEM 3 VALUE 30,387
MAXIMUM VALUES ELEM 47 VALUE 3666,9	MAXIMUM VALUES ELEM 47 VALUE 4066,5	MAXIMUM VALUES ELEM 61 VALUE 3075,4	MAXIMUM VALUES ELEM 61 VALUE 4075,4

APÊNDICE D

Tabela 1D - Algumas medidas experimentais de deformações dos pneus, utilizadas para compará-las com as obtidas pelas equações empíricas

Condição A - Estático (trator apoiado com todos os pneus em uma plataforma inclinável)															
Ângulo pista(gr)		Ângulo chassi(gr)		D _{vtd} (mm)		D _{vte} (mm)		D _{vfd} (mm)		D _{vfe} (mm)		Pressão enchimento (kPa)			
Medido	simulado	medido	simulado	medido	simulado	Medido	simulado	medido	simulado	medido	simulado	fd	fe	td	te
36,4	36,4	42	40,0	95	111,5	15	1,0	30	29,7	5	5,0	165	165	83	83
37,3	37,3	41	41,2	100	117,6	16	-1,9	30	29,7	5	5,1	165	124	76	48

Condição B - Estático (trator apoiado do lado direito sobre uma superfície plana e, do esquerdo, em uma plataforma inclinável)															
Ângulo pista(gr)		Ângulo chassi(gr)		D _{vtd} (mm)		D _{vte} (mm)		D _{vfd} (mm)		D _{vfe} (mm)		Pressão enchimento (kPa)			
Medido	simulado	medido	simulado	medido	simulado	Medido	simulado	medido	simulado	medido	simulado	Fd	fe	td	te
38	38	44	44,2	340	180,7	20	-7,7	60	29,6	5	2,8	165	165	28	83
39	39	44	42,8	250	112,6	20	-4,9	60	29,7	5	3,5	165	165	83	83
39	39	44	43,1	250	118,3	20	-7,1	60	29,7	5	3,4	165	124	76	48

Condição B - Estático (trator posicionado em curva, na pista espiral de testes)															
Ângulo pista(gr)		Ângulo chassi(gr)		D _{vtd} (mm)		D _{vte} (mm)		D _{vfd} (mm)		D _{vfe} (mm)		Pressão enchimento (kPa)			
medido	simulado	medido	simulado	medido	simulado	Medido	simulado	medido	simulado	medido	simulado	fd	fe	td	te
0	0	-1	-0,9	42	72,4	70	102,2	12	22,3	34	26,9	165	124	76	48
30	30	35	33,0	200	113,3	30	20,1	30	29,4	5	10,0	165	124	76	48
32	32	38	35,2	200	114,7	20	14,0	30	29,6	6	8,7	165	124	76	48
34	34	40	37,5	220	115,9	0	8,0	30	29,7	5	7,3	165	124	76	48

*As equações da constante de rigidez elástica, dos pneus traseiros, foram multiplicadas por 0,33, para melhor correlacionar com os valores experimentais. Este valor foi determinado a partir das deformações obtidas na condição A, pois a condição B as majorava, pelo fato de os pneus do lado direito estarem apoiados sobre uma pista plana com o trator inclinado e de as medidas terem sido feitas externamente ao pneu, cuja lateral não se encontrava perpendicular à pista plana.

*Variaram-se ângulo de inclinação da pista, condição de apoio dos rodados e pressão de enchimento dos pneus, semelhante ao que ocorreu nos testes experimentais de verificação do modelo.

