

# ENGENHARIA AGRÍCOLA

## SIMULAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TRATORES AGRÍCOLAS 4 X 2 <sup>(1)</sup>

JOSEPH KALIL KHOURY JUNIOR <sup>(2)</sup>; CRISTIANO MÁRCIO ALVES DE SOUZA <sup>(3,4)</sup>;  
LEIDY ZULYS LEYVA RAFULL <sup>(3,4)</sup>; CARLOS ALBERTO ALVES VARELLA <sup>(2)</sup>

### RESUMO

O objetivo do trabalho foi simular computacionalmente a estabilidade de tratores agrícolas 4x2. Experimentos de simulação foram realizados visando analisar o comportamento dinâmico de um trator agrícola 4x2 trabalhando em diferentes condições de operação e de terreno. 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 de pior situação, o que corresponde ao trator descer por uma diagonal em pista inclinada para a esquerda. A bitola e a localização do centro de gravidade na vertical foram os fatores que mais afetaram a estabilidade do trator em tombamentos laterais. Já, a localização do centro de gravidade na longitudinal e a distância entre eixos afetaram mais a estabilidade do trator em tombamentos para trás. O trator deslizou os rodados do lado do tombamento ou perdeu a dirigibilidade dos pneus frontais com ângulos inferiores aos limites de estabilidade para tombamento.

**Palavras-chave:** mecanização agrícola, tombamento, segurança

### ABSTRACT

#### SIMULATION OF THE STABILITY OF 2WD AGRICULTURAL TRACTORS

The objective of this work was to predict the loss of 2WD tractors stability. Simulations were done to analyze the dynamic behavior of an agricultural tractor working in different operation and surface conditions. 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 tractor either slip the wheels at the side overturning or lost the front tire controlling at angles less than the overturning limits.

**Key words:** agricultural mechanization, overturning, safety.

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em 8 de outubro de 2007 e aceito em 24 de setembro de 2008.

<sup>(2)</sup> IT/DE, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica (RJ), 23890-000. E-mail: kalil@ufrj.br; varella@ufrj.br; zulys@ufgd.edu.br

<sup>(3)</sup> Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Caixa Postal 533, 79804-970 Dourados (MS). E-mail: csouza@ufgd.edu.br <sup>(\*)</sup> Autor correspondente.

<sup>(4)</sup> Bolsista do CNPq.

## 1. INTRODUÇÃO

A estimativa mundial da frota de tratores de rodas é de 26,7 milhões de unidades, correspondendo à frota brasileira a 383.000 (ANFAVEA, 2005). A crescente utilização do trator agrícola tem trazido como consequência o aumento de acidentes de trabalho, mesmo com as diversas melhorias realizadas no seu projeto para aumentar a eficiência, conforto e segurança nas operações.

A maioria dos acidentes envolvendo tratores são fatais. Mesmo com o desenvolvimento tecnológico que favoreceram o projeto dessas máquinas, os acidentes por tombamento continuam sendo a principal causa. A FUNDACENTRO (1979) estimou que de 85% desses acidentes, 70% são devidos ao tombamento lateral e 15% ao tombamento para trás. DELGADO (1991) e SCHLOSSER et al. (2002) pesquisando sobre o assunto, constataram respectivamente que 60% e 52% dos acidentes foram causados por tombamentos de tratores. Estudos mais recentes, realizados entre 1992 e 2002 nos Estados Unidos da América, indicaram que 42% dos acidentes fatais com tratores têm sido devido a tombamento (SANDERSON et al., 2006).

DEBIASI et al. (2004), estudando as causas dos acidentes de trabalho envolvendo conjuntos tratorizados, concluíram que os acidentes foram causados por atitudes e condições inseguras, representando 82% e 18% respectivamente. Destacando-se entre as principais causas a operação do trator em condições para as quais não foi projetado e a perda de controle em aclives/declives.

A estabilidade do trator é um parâmetro que devido à sua significativa influência no tombamento do trator tem sido há muitos anos, motivo de estudo de diferentes autores. O comportamento dos tratores em acidentes com tombamento lateral, além da estabilidade lateral quando se movimentando em curva e sob alta velocidade tem sido estudado por meio de simulações. Em estudos realizados sobre os efeitos dos parâmetros que caracterizam a relação pneu-solo, têm grande influência a estabilidade de tratores e o conhecimento das forças laterais que atuam nos pneus, assim como as forças laterais e de tração que atuam no sistema em estudo, sendo de grande importância para realizar uma simulação correta da dinâmica do trator (REHKUGLER et al., 1976; REHKUGLER, 1982; KIM e REHKUGLER, 1987).

Estudos mais recentes simularam o comportamento da estabilidade de um trator, tracionando uma carreta durante a subida e descida de uma ladeira. Foi definido o limite da carga e o ângulo de inclinação em que pode trabalhar o

conjunto para não se tornar instável (ABU-HAMDEH e AL-JALIL, 2004).

KHOURY JUNIOR et al. (2004) desenvolveram um modelo matemático capaz de prever a perda da estabilidade de tratores 4x2, sem implemento acoplado, com satisfatória precisão. Nesse modelo matemático incluiu-se como avanço a consideração da força centrífuga atuando no trator. Os autores concluíram que a energia adquirida pelo chassi do trator no início do estágio de tombamento é capaz de lhe dar continuidade, quando o chassi colide com o eixo frontal. O modelo matemático desenvolvido por esses autores foi validado para o limite de estabilidade lateral para o trator operando em curva de nível, porém o modelo permite simular o trator operando em quaisquer posições de operação em pista.

Os estudos da dinâmica de tratores agrícolas utilizando modelos matemáticos têm sido muito úteis para o desenvolvimento de projetos de tratores otimizados e mais seguros. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi simular o comportamento da estabilidade lateral de tratores agrícolas 4 x 2, e realizar análises em diferentes situações operacionais e inclinação de terreno.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Um modelo computacional foi desenvolvido, em linguagem MS Visual Basic, para simular a estabilidade lateral de tratores agrícolas de pneus 4x2. No modelo foram utilizadas as características geométricas e ponderais do trator e de sua condição em um terreno plano ou inclinado. Análises de balanço de forças e de momentos foram realizadas para determinar as equações que regem o comportamento estático e dinâmico do trator sobre uma superfície, conforme apresentado por KHOURY JUNIOR et al. (2004). Foram feitas algumas considerações e simplificações no modelo, tais como: no cálculo das forças centrífugas atuando nos centro de gravidade frontal (cgf) e centro de gravidade parcial (cgp) do 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. No modelo computacional, calcula-se 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.

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 esteja fazendo curva, faz com que as reações 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, calculada pela Equação 1.

$$\theta_{dl} = \arcsen \frac{D_{vt}}{B_t - D_{lt}} \quad (1)$$

em que,  $\theta_{dl}$  - ângulo de inclinação lateral devido às deformações dos pneus, graus;  $(B_t - D_{lt})$  - bitola efetiva do trator após deformações laterais, m;  $D_{vt}$  - deformação vertical resultante dos pneus traseiros, m;  $D_{lt}$  - deformação lateral resultante dos pneus traseiros, m;  $B_t$  - bitola traseira, m.

Esta inclinação lateral é somada na inclinação do chassi do trator calculado inicialmente, sem considerar as deformações dos pneus. O aumento na inclinação do chassi acarretará diminuição da inclinação-limite da pista para tombamento lateral do trator, podendo estar mais inclinado do que a pista em que está 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.

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.

Como apresentado por KHOURY JUNIOR et al. (2004), 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:

$$D_{vt} = D_{vtd} - D_{vte} \quad (2)$$

$$D_{lt} = D_{ltd} - D_{lte} \quad (3)$$

em que,  $D_{vt}$  - deformação vertical resultante dos pneus traseiros, m;  $D_{vtd}$  - deformação vertical resultante dos pneus traseiros, lado direito, m;  $D_{vte}$  - deformação

vertical resultante dos pneus traseiros, lado esquerdo, m;  $D_{lt}$  - deformação lateral resultante dos pneus traseiros, m;  $D_{ltd}$  - deformação lateral resultante dos pneus traseiros, lado direito, m;  $D_{lte}$  - deformação lateral resultante dos pneus traseiros, lado esquerdo, m.

O desequilíbrio das reações nos pneus do trator, mais de um lado do que do 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. Estas deformações dependem das reações aplicadas nos pneus, 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 de acordo com KHOURY JUNIOR et al. (2004), e das constantes de rigidez (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, as deformações dos pneus foram determinadas. Um ajuste foi feito na equação que determina a constante de rigidez dos pneus traseiros, isto é, os valores obtidos por esta equação foram multiplicados por um coeficiente igual a 0,33. Este ajuste foi feito para reduzir a constante de rigidez em um terço, pois pelas medidas tomadas experimentalmente constataram-se valores de deformações verticais três vezes menores do que aquelas calculadas conforme proposto por INOUE (1997). 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 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 de 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 foram calculadas pelas seguintes equações:

$$K_{vfk} = 70,82 + 0,613P_{fk} \quad (4)$$

$$K_{vtk} = 0,33(105 + 1,6454P_{tk}) \quad (5)$$

$$K_{lfk} = 43 + 4,29111G_{fk} + 0,5667.P_{fk} - 0,2449G_{fk}^2 \quad (6)$$

$$K_{ltk} = 146 - 0,0056R_{tk} + 1,8432P_{tk} - 0,0346G_{tk}P_{tk} \quad (7)$$

em que,  $K_{vjk}$  - constante de rigidez vertical, posição  $j$ , lado  $k$ ,  $\text{kN m}^{-1}$ ;  $K_{ljk}$  - constante de rigidez lateral, posição  $j$ , lado  $k$ ,  $\text{kN m}^{-1}$ ;  $G_{jk}$  - altura da garra do pneu traseiro, posição  $j$ , lado  $k$ ,  $\text{mm}$ ;  $P_{jk}$  - pressão de enchimento dos pneus, posição  $j$ , lado  $k$ ,  $\text{kPa}$ ;  $j$  - posição ( $f$  = frontal;  $t$  = traseiro);  $k$  = lado ( $d$  = direito;  $e$  = esquerdo).

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

$$D_{vjk} = \frac{R_{jk}}{K_{vjk}} \quad (8)$$

$$D_{ljk} = \frac{L_{jk}}{K_{ljk}} \quad (9)$$

em que,  $D_{vjk}$  - deformação vertical do pneu em posição  $j$ , lado  $k$ ,  $\text{m}$ ;  $D_{ljk}$  - deformação lateral do pneu em posição  $j$ , lado  $k$ ,  $\text{m}$ ;  $R_{jk}$  - reação vertical do pneu em posição  $j$ , lado  $k$ ,  $\text{kN}$ ;  $L_{jk}$  - reação lateral do pneu em posição  $j$ , lado  $k$ ,  $\text{kN}$ .

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. 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 do trator em relação ao deslocamento na pista ( $j$ ).

O procedimento e as equações para determinar o limite de inclinação da pista em operações diversas de posicionamento, em uma pista inclinada, ocorrerão como descritos a seguir: Inicialmente, obtêm-se as reações nos pneus sem considerar suas deformações. Com essas reações iniciais, calculam-se as deformações dos pneus e o efeito delas na inclinação lateral do chassi; assim, o modelo faz  $n$  iterações igual a 10, 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, somando na inclinação do chassi (Equação 10); a inclinação foi atribuída às deformações dos pneus.

$$\theta_{chL} = \theta_{ch} + \theta_{dl} \quad (10)$$

em que,  $\theta_{ch}$  - ângulo de inclinação do chassi, sem deformações dos pneus, graus;  $\theta_{chL}$  - ângulo-limite de inclinação do chassi após deformações dos pneus, graus.

O ângulo-limite de inclinação da pista (Equação 11) que corresponde à inclinação-limite do chassi foi utilizado em cada iteração para recalculas as reações solo-pneu:

$$\theta_L = \arcsen \left[ \frac{\text{sen}(\theta_{chL})}{\text{sen}(\varphi)} \right] \quad (11)$$

em que,  $\theta_L$  - ângulo-limite de inclinação da pista, graus.

Quando o trator estiver posicionado em um ângulo  $\varphi$  igual a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , a Equação 11 torna-se indeterminada, pois o seno destes ângulos é zero. No entanto, a inclinação lateral do chassi  $q_{ch}$ , 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  $q_{chL} = q_{ch}$ .

Substituindo na Equação 11, tem-se:

$$\text{sen } \theta_{ch} = \text{sen } \theta \text{ sen } \varphi \quad (12)$$

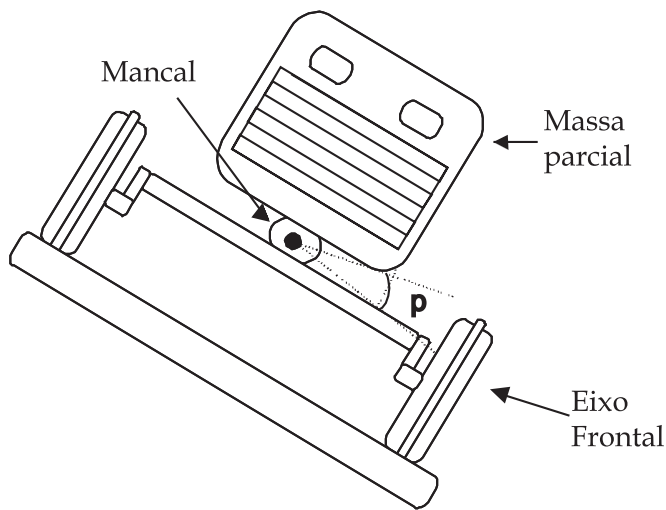
E cortando  $\text{sen } \varphi$ , a Equação 11 tende para  $\theta, \theta_L = \theta$ . Com isso, o limite de estabilidade é a inclinação da pista sem descontar o efeito das deformações dos pneus, e o ângulo-limite calculado nessas posições é chamado limite de estabilidade longitudinal.

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  $\theta$ , a uma posição  $\varphi$  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 1) 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.

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. Verifica-se, então, se 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., 1993). 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. Porém, nesse trabalho não foi determinado se ocorreria o segundo estágio do tombamento, pois ao iniciar o primeiro estágio já é uma condição de instabilidade.



**Figura 1.** Vista frontal da ligação pelo mancal da massa parcial com o eixo frontal e o ângulo de liberdade (p) entre eles.

O modelo permite também obter o limite de estabilidade longitudinal para o trator operando em declive (descendo) e aclive (subindo). Para obter o limite de estabilidade em aclive, tombamento para trás, o ângulo  $\phi$ , 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  $j$  relativo ao eixo longitudinal é de  $180^\circ$ ; 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.

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 prever 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:

$$F_{a_{fk}} = 881 + 158G_{fk} + 0,00003R_{fk}^2 - 3,33G_{fk}^2 + 0,0182P_{fk}^2 - 0,4908G_{fk}P_{fk} \quad (13)$$

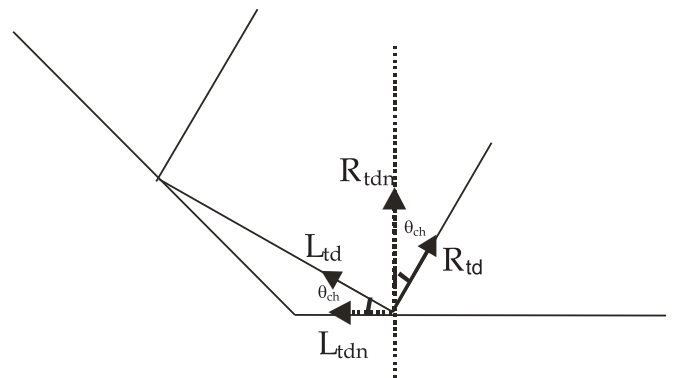
$$F_{a_{tk}} = 1444 + 0,7274R_{tk} - 0,0023P_{tk}R_{tk} \quad (14)$$

em que,  $F_{a_{jk}}$  - força de aderência lateral dos pneus, posição  $j$ , lado  $k$ , N;  $G_{fk}$  - altura das garras dos pneus frontais, lado  $k$ , mm;  $P_{fk}$  - pressão de enchimento dos pneus, posição  $j$ , lado  $k$ , 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. As reações verticais dos pneus, para cálculo da força de aderência lateral (Figura 2), foram estimadas conforme segue:

$$R_{tdn} = R_{td} \cos(\theta_{ch}) + L_{td} \sin(\theta_{ch}) \quad (15)$$

em que,  $R_{tdn}$  - reação vertical na pista plana do lado direito (N);  $\theta_{ch}$  - inclinação do chassi do trator (graus).



**Figura 2.** Reações verticais e laterais dos rodados do lado direito apoiados em uma pista plana.

Como a força de aderência lateral ocorre em função da reação vertical, substituindo a Equação (15) em (13) e (14), obtém-se:

$$F_{a_{fdn}} = 881 + 158G_{fd} + 0,00003R_{fdn}^2 - 3,33G_{fd}^2 + 0,0182P_{fd}^2 - 0,4908G_{fd}P_{fd} \quad (16)$$

$$F_{a_{tdn}} = 1444 + 0,7274R_{tdn} - 0,0023P_{td}R_{tdn} \quad (17)$$

em que,  $F_{a_{fdn}}$  - força de aderência do pneu frontal direito, sobre a pista plana, em situação do trator inclinado (N);  $F_{a_{tdn}}$  - força de aderência do pneu traseiro direito, sobre a pista plana, em situação do trator inclinado (N).

Para comparar com a  $F_{a_{fdn}}$  e  $F_{a_{tdn}}$ , foi calculada a reação lateral dos pneus na mesma situação da Figura 2, dada por  $L_{fdn}$  e  $L_{tdn}$ .

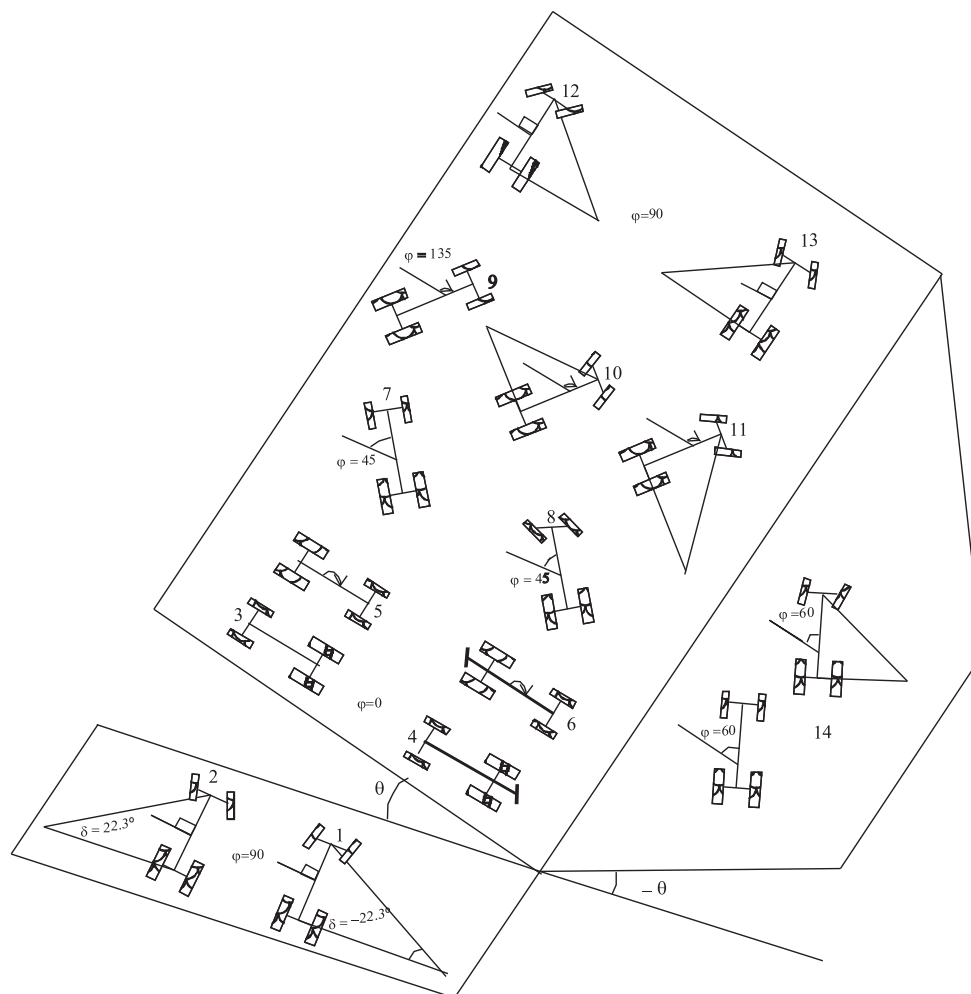
$$L_{fdn} = L_{fd} \cos(\theta_{ch}) - R_{fd} \sin(\theta_{ch}) \quad (18)$$

$$L_{tdn} = L_{td} \cos(\theta_{ch}) - R_{td} \sin(\theta_{ch}) \quad (19)$$

em que,  $L_{fdn}$  - reação lateral do pneu frontal direito, sobre a pista plana, em situação do trator inclinado, N;  $L_{tdn}$  - reação lateral do pneu traseiro direito, sobre a pista plana, em situação do trator inclinado, N.

Por meio de simulações, também foi estudado os limites de inclinação e as velocidades máximas para diferentes situações de operação (Figura 3). Todos os testes foram feitos sob as mesmas condições de pressão de enchimento e altura de garras dos pneus, bitolas traseira e frontal, localização do centro de gravidade (cg), dimensões do trator e tipo de solo, a fim de melhor avaliar a variação do ângulo de posição ( $\varphi$ ) do trator em uma pista inclinada.

As condições simuladas, inseridas como parâmetros de entrada do modelo computacional desenvolvido, e utilizadas para analisar o comportamento do trator diante de diversas situações de operação são apresentadas na tabela 1.



**Figura 3.** Situações 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).



**Tabela 1.** Parâmetros de entrada do modelo computacional desenvolvido usados nas simulações realizadas para estudar o comportamento do trator em diversas situações de operação de campo

Teste	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	V ( $m\ s^{-1}$ )	r (m)	$\delta$ ( $^{\circ}$ )	FBT (N)
1	0	90	?	-5	-22,34	0
2	0	90	?	5	22,34	0
3	?	0	0,0	fr	0	0
4	?	0	0,0	fr	0	10.000
5	?	180	0,0	fr	0	0
6	?	180	0,0	fr	0	10.000
7	?	45	0,0	fr	0	0
8	?	45	3,0	5	22,34	0
9	?	135	0,0	*	0	0
10	?	135	3,0	5	22,34	0
11	?	135	3,0	-5	-22,34	0
12	?	90	1,5	-5	-22,34	0
12.1	?	90	3,0	-5	-22,34	0
13	?	90	1,5	5	22,34	0
13.1	?	90	3,0	5	22,34	0
14	?	60	0,0	fr	22,34	0
14.1	?	60	1,5	-5	22,34	0
14.2	?	60	3,0	-5	22,34	0

FBT - força na barra de tração. Para um observador traseiro: ângulo  $\varphi$  varia de  $[0, 180^{\circ}]$ , sentido horário; ângulo  $\theta$  varia de  $[0, 90^{\circ}]$ , inclinação para a direita (sentido horário);  $[0, -90^{\circ}]$ , inclinação para a esquerda (sentido anti-horário); r (+), curva para a esquerda; r (-), curva para a direita. fr - testes com os pneus frontais em linha reta.  $\theta$  - ângulo de inclinação da pista, graus.  $\varphi$  - ângulo de posição do trator em relação ao deslocamento na pista, graus. V - velocidade máxima permitida para o tombamento,  $m\ s^{-1}$ . r - raio de curvatura, m.  $\delta$  - ângulo de esterçamento dos pneus frontais. ? - parâmetro obtido na simulação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo computacional desenvolvido para simular o comportamento da estabilidade transversal e longitudinal de tratores de pneus 4 x 2 oferece os valores da inclinação-limite da pista e do chassi, das reações verticais em todos os pneus, o tipo de tombamento e a localização dos pneus quando houve deslizamento (Tabela 2).

O deslizamento dos pneus ocorreu quando a força de aderência não suportou a reação lateral. Foi observado que nos testes onde ocorreu o tombamento lateral, o deslizamento ocorreu em primeiro momento em todos os pneus. Agora, o tombamento lateral ocorreu quando houve um acréscimo relativamente pequeno na inclinação da pista onde ocorreu o deslizamento.

O deslocamento do trator em pista plana foi simulado nos dois primeiros testes. Observou-se no teste 1, que quando a operação foi realizada em uma curva de 5 m de raio para a direita, a uma velocidade de  $5,92\ m\ s^{-1}$ , ocorreu o tombamento do trator para a esquerda. Já no teste 2, fazendo uma

curva de mesmo raio para o lado contrário, com uma velocidade de  $6,17\ m\ s^{-1}$ , ocorreu o tombamento para o lado direito do trator. Essas simulações revelaram que o modelo é sensível à localização do centro de gravidade na direção transversal ao trator (eixo Y). O trator utilizado nestas simulações possui o centro de gravidade deslocado para a esquerda em  $-0,024\ m$ ; desse modo, possui menor estabilidade para tombamentos laterais para a esquerda.

Uma análise estática simulando uma operação de aclave foi representada nos testes 3 e 4. Para essa situação, o modelo calculou as reações nos pneus frontais inferiores a zero, indicando a não-existência de força de reação nos mesmos e conseqüentemente provocando o tombamento do trator para trás. No terceiro teste o ângulo de inclinação limite da pista foi de  $41,3^{\circ}$ ; enquanto para o quarto teste, quando foi simulada uma força na barra de tração de 10.000 N, esse ângulo caiu para  $31,5^{\circ}$ , devido ao efeito da transferência de massa do eixo frontal para o traseiro, que influi no cálculo do balanço das forças e dos momentos que atuam no trator.

**Tabela 2.** Simulações realizadas para estudar o comportamento do trator em diversas situações de operação e inclinação de terreno

Teste de simulação	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	V ( $m\ s^{-1}$ )	$\phi$	Fc (N)	Pneu em que $F_{a_{jk}} < L_{jk}$	Rte	Rtd	Rfe	Rfd	Tipo de tomb.
1	0	5,9	-4,8	-13909	te, fe	11801	-12,4	5861	601	esq
2	0	6,2	4,8	15016	td, fd	-3,8	11794	345	6012	dir
3	41,3	0,0	-0,1	0	-	7516	7258	-0,7	-129	trás
4-FBT	31,5	0,0	-0,1	0	-	8528	8202	-3,7	-106	trás
5	50,7	0,0	-0,2	0	-	410	-12,6	5899	6050	esq
6-FBT	58,6	0,0	-0,2	0	-	378	-3,0	4807	4974	esq
7	32,1	0,0	24,3	0	fd, fe	3847	9400	-15,4	2624	rn
8	22,5	3,0	18,4	3571	fd, fe	3263	9996	-0,2	3171	rn
9	33,1	0,0	24,9	0	td	-0,7	5575	3602	6474	dir
10	24,9	3,0	20,1	3571	td, fd	-2,5	6930	2699	6176	dir
11	42,1	3,0	30,1	-3571	td	-0,7	4437	4372	6736	dir
12	37,7	1,5	41,1	-893	td, fd	-0,2	8533	1307	5431	dir
12.1	45,4	3,0	48,9	-3571	td, fd	-1,5	8666	1327	5515	dir
13	36,2	1,5	39,9	893	td, fd	-0,9	9332	275	4757	dir
13.1	28,4	3,0	32,2	3571	td, fd	-1,0	9477	279	4832	dir
14	-29,9	0,0	-28,5	0	te, fe	7266	-0,1	6052	2947	esq
14.1	-28,9	1,5	-27,9	-893	te, fe	7689	-1,2	5807	2502	esq
14.2	-22,1	3,0	-22,4	-3571	te, fe	8285	-1,5	5733	2140	esq

FBT - simulação com força na barra de tração de 10.000 N. Para um observador traseiro: ângulo  $\phi$  varia de  $[0, 180^{\circ}]$ , sentido horário; ângulo  $\theta$  varia de  $[0, 90^{\circ}]$ , inclinação para a direita (sentido horário);  $[0, -90^{\circ}]$ , inclinação para a esquerda (sentido anti-horário); r (+), curva para a esquerda; r (-), curva para a direita. fr - testes com os pneus frontais em linha reta. rn - testes em que ocorreu reação negativa primeiro nos pneus frontais para tombamento lateral.  $\theta$  - ângulo de inclinação da pista, graus ( $^{\circ}$ ). V - velocidade máxima permitida para o tombamento,  $m\ s^{-1}$ .  $\phi$  - Ângulo de inclinação do chassi no limite de estabilidade, graus.  $R_{jk}$  - reação vertical no pneu, posição j, lado k, N.  $F_{a_{jk}}$  - força de aderência lateral dos pneus, posição j, lado k, N;  $L_{jk}$  - reação lateral do pneu, posição j, lado k, N. Fc - força centrífuga calculada.

Na operação do trator em declive, simulada nos testes 5 e 6, o ângulo de inclinação limite da pista, onde ainda há estabilidade do trator, foi de  $50,7^{\circ}$  e  $58,6^{\circ}$  respectivamente. Para essas condições, o tombamento ocorreu para a esquerda. Por estar simulando uma operação de declive, esperava-se que o tombamento ocorresse para frente. A razão pela qual ocorreu o tombamento lateral para a esquerda, foi atribuída ao centro de gravidade do trator estar deslocado transversalmente para este lado. No sexto teste, quando foi simulado o trator realizando uma força na barra de tração de 10.000 N, o ângulo de inclinação-limite da pista foi ainda maior, decorrente da força na barra de tração a qual contribuiu para a estabilidade, uma vez que a transferência de massa para o eixo traseiro do trator garante mais estabilidade.

As simulações realizadas nos testes 7 e 8 revelam 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. 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  $22,5^{\circ}$  respectivamente. Somente nos testes que representam o trator subindo por uma diagonal em uma pista inclinada, compreendidos nos ângulos de posição ( $\phi$ ) de  $0^{\circ}$  a  $80^{\circ}$ , ocorreram reações nulas primeiramente no pneu frontal antes do traseiro.

Nas simulações dos testes 9, 10 e 11, o trator desce por uma diagonal em uma pista inclinada ( $\phi = 135^{\circ}$ ). No teste 9, operando em linha reta, o limite foi de  $33,1^{\circ}$ , e, ao se fazer uma curva para a esquerda (teste 10), o limite caiu para  $24,9^{\circ}$ , porém, fazendo a curva para a direita (teste 11), este subiu para  $42,1^{\circ}$ . Verificou-se, dentre os testes simulados, que os testes 9, 10 e 11 foram os que resultaram em 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 ( $\phi$ ).

Nas simulações dos testes 12, 12.1, 13 e 13.1 as situações foram semelhantes às dos testes experimentais, ou seja, operou-se em curva de nível



( $\varphi = 90^\circ$ ). Nestes testes, primeiro ocorreu deslizamento dos pneus do lado de apoio do trator e depois o tombamento para o mesmo lado, isto é, lado direito do trator. 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 estar com o mesmo ângulo de posicionamento ( $\varphi$ ); 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.

Feita uma análise geral sobre as operações com o trator, simuladas nos testes apresentados na tabela 2, verificou-se que a posição ( $\varphi$ ) do trator simulado com 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 m. 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 ( $\varphi$ ) igual a  $60^\circ$ , foi aquele em que se obteve o menor limite de estabilidade para tombamento lateral sendo o ângulo-limite da pista de  $-29,9^\circ$ . No teste 14.1, em que, ao descer em linha reta por uma diagonal na pista inclinada, se inicia uma curva para direita a  $1,5 \text{ m s}^{-1}$ , o ângulo-limite caiu para  $-28,1^\circ$ , e, no teste 14.2, aumentando a velocidade para  $3,0 \text{ m s}^{-1}$ , em uma curva também para direita, o limite diminuiu para  $-22,1^\circ$ . As condições simuladas nestes testes foram aquelas em que se obtiveram menores ângulos-limite de tombamentos laterais, quando comparados com os mesmos raios de curva e velocidades apresentados nas tabelas 1 e 2.

Na tabela 3 relacionam-se as variáveis de entrada do modelo, referentes a algumas das medidas do trator que afetam sua estabilidade. Em cada variação, mantiveram-se os outros dados de entrada em uma condição-padrão (1), para melhor comparação do efeito destas variáveis.

**Tabela 3.** 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)

Simulação	Bitola $B_t=B_f$	$Z_{cgp}$	$Z_{cgf}$	$X_{cgp}$	$X_{cgf}$	$Y_{cgp}$	$X_L$	Ângulo de inclinação e lado de tombamento
n.º	m							
1	1,44	0,945	0,46	0,706	2,02	- 0,024	1,95	36,9º direito 41,3º p/ trás
2	1,87	0,945	0,46	0,706	2,02	- 0,024	1,95	41,2º p/ trás 43,6º direito
3*	1,44	0,66	0,32	0,706	2,02	- 0,024	1,95	48,2º $R_{fe} < 0$ 51,1º p/ trás
4*	1,44	0,66	0,32	0,706	2,02	- 0,024	1,95	47,5º direito 51,6º p/ trás
5	1,44	0,945	0,46	0,49	2,02	- 0,024	1,95	33,2º p/ trás 37,9º direito
6	1,44	0,945	0,46	0,706	2,02	+ 0,024	1,95	34,4º direito 41,3º p/ trás
7	1,44	0,945	0,46	0,49	1,41	- 0,024	1,37	31,4º p/ trás 37,1º 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 aclave ( $\varphi = 0^\circ$ ), 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. Simulação 3\* e 4\* - reduziu-se também a posição da altura do mancal de 0,63 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.  $Z_{cgp}$  - localização vertical do cgp.  $Z_{cgf}$  - localização vertical do cgf.  $X_{cgp}$  - localização longitudinal do cgp.  $X_{cgf}$  - localização longitudinal do cgf.  $Y_{cgp}$  - localização transversal do cgp.  $X_L$  - Distância entre eixos.

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, em uma 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, 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, a variável distância entre os eixos ( $X_L$ ) e a 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 na 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 modelo 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 que a força de aderência dos pneus deve ser melhorada, pois pelas equações empíricas utilizadas no modelo computacional para prever a força de aderência dos pneus constatou-se 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.

#### 4. CONCLUSÕES

1. O ângulo de posição do trator em relação a uma pista inclinada igual a 60° foi a condição de operação simulada com menor estabilidade para tombamento lateral.
2. 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.
3. A localização do centro de gravidade na coordenada longitudinal e a distância entre eixos afetaram a estabilidade do trator em tombamentos para trás.
4. O trator deslizava os rodados do lado do tombamento ou perdia a dirigibilidade dos pneus frontais com ângulos inferiores aos limites de estabilidade simulada por tombamento.

#### AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelas Bolsas de Produtividade em Pesquisa (PQ) e de Pesquisa (DCR/FUNDECT-MS) concedidas.

#### REFERÊNCIAS

- ABU-HAMDEH, N.H.; AL-JALIL, H.F. Computer simulation of stability and control of tractor trailed implement combinations under different operating conditions. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.1, p.149-162, 2004.
- ANFAVEA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira**. 2005, Disponível em: [http://www.anfavea.com.br/Anuario2005/Cap01\\_2005\\_1-14\\_1-15.pdf](http://www.anfavea.com.br/Anuario2005/Cap01_2005_1-14_1-15.pdf). Acesso em 18 out 2005.
- DEBIASI, H.; SCHLOSSER, J.F.; WILLES, J.A. Acidentes de trabalho envolvendo conjuntos tratorizados em propriedades rurais do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria. v.34, n.3, p.779-784, 2004.
- DELGADO, L.M. **El tractor agrícola características y utilización**. Madrid: 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, 1993. p.1838-1846.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA - FUNDACENTRO. **Manual de segurança, higiene e medicina do trabalhador rural**. São Paulo: 1979. 84p.

INOUE, G.H., **Estudo das forças nos pneus de tratores agrícolas visando avaliar a estabilidade lateral**. Viçosa: UFV, 1997. 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.

KHOURY JUNIOR, J.K., DIAS, G.P., CORDEIRO, R.R., SOUZA, C.M.A. Modelagem da estabilidade de tratores agrícolas de pneus. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.5, p.459-468, 2004.

KIM, K.U., REHKUGLER, G. E. A review of tractor dynamics and stability. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.30, n.3, p.615-623, 1987.

REHKUGLER, G.E. Tractor steering dynamics – simulated and measured. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 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, St. Joseph**, v30, n.3, p.601-604, 1976.

SANDERSON, W.T.; MADSEN, M.D.; RAUTIAINEN, R.; KELLY, K.M.; ZWERLING, C.; TAYLOR, C.D.; REYNOLDS, S.J.; STROMQUIST, A.M.; BURMEISTER, L.F.; MERCHANT, J.A. Tractor overturn concerns in Iowa: perspectives from the Keokuk county rural health study. **Journal of Agricultural Safety and Health**, v.12, n.1, p.71-81, 2006.

SCHLOSSER, J.F.; DEBIASI, H., PARCIANELLO, G.; RAMBO, L. Caracterização dos acidentes com tratores agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.6, p.977-981, 2002.