TOMBAMENTO LATERAL DE TRATORES AGRÍCOLAS: AVALIAÇÃO DO USO DE UM CLINÔMETRO PARA SUA PREVENÇÃO

SERGIO PEREIRA DE SOUZA

Licenciado em Ciências Agrícolas

Orientador: Prof. Dr. José Paulo Molin

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia, Área de Concentração: Máquinas
Agrícolas.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Dezembro - 2001

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Souza, Sérgio Pereira de

Tombamento lateral de tratores agrícolas : avaliação do uso de um clinômetro para sua prevenção / Sérgio Pereira de Souza. - - Piracicaba, 2001.

64 p. : il.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001.
Bibliografia.

1. Engenharia agrícola 2. Instrumento de medida 3. Mecanização agrícola 4.
Prevenção de acidentes 5. Taludes 6. Trator agrícola I. Título

CDD 631.372

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICO

A minha família pelo apoio em
todos os momentos da vida.

Aos meus pais, Antônio José de Souza e Zilah
Aparecida Pereira de Souza, por toda dedicação,
incentivo e compreensão, **OFEREÇO.**

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido a vida e a família que tenho.

Ao Professor Dr. José Paulo Molin, pela amizade, orientação, ensinamentos, compreensão e colaboração na execução desse trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural: Marcos Milan, Walter Molina, Caetano Rípoli. Em especial ao professor PhD. Luis Antônio Balastreire pelas sugestões e contribuições diretas à realização desse trabalho.

Ao engenheiro agrônomo Gilson José de Souza pelas sugestões, apoio e contribuição à execução desse trabalho.

Aos professores Dr. Luiz Geraldo Mialhe da ESALQ/USP e Dra. Ângela Lanas da UFRRJ pelas orientações e sugestões ao desenvolvimento desse trabalho.

Ao engenheiro eletrônico do laboratório de instrumentação Juarez Amaral que sempre atendeu com presteza e competência as solicitações.

À direção da unidade do Senai em Piracicaba na figura dos senhores Luís Rosa e Marin Fernandes que gentilmente colaboram com equipamentos e laboratório.

À jovem Rauliane Dias pela colaboração feita de forma tão precisa e ágil.

Aos colegas do curso de mestrado: Maurício Javier DeLeon, Antônio Barros, Pedro Zambuzi, Edmilson Ruiz, Ricardo Fernandes, Ricardo Pinto, João Araújo, Danilo Marrara, Sergio Carvalho, Pedro Vicente Careli (in memorian), Moisés Néri, Wagner Campaner, Raimundo Leite e Thiago Romanelli.

Aos funcionários do DER da ESALQ-USP principalmente o operador de máquinas agrícolas João G. da Silva e ao técnico em eletrônica Adilson Silva.

Aos colegas professores do Colégio Agrícola Nilo Peçanha e em especial: André Elias, Édson Azeredo, José E. Dias, Mário Lázaro.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a execução desse trabalho.

OBRIGADO

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xii
SUMMARY.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Acidentes com tratores agrícolas: causas e conseqüências.....	3
2.2 Estruturas de proteção contra capotagem: aspectos básicos.....	14
2.3 Modelos para predição da declividade limite.....	17
2.4 Aplicações de clinômetros	23
2.5 Instrumentos de medição.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Material.....	29
3.2 Métodos.....	31
3.2.1 Metodologia para o ensaio do clinômetro sob condições estáticas.....	31
3.2.2 Ensaio de campo.....	34
3.3 Delineamento estatístico empregado.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1 Ensaio do clinômetro sob condições estáticas.....	40
4.2 Ensaio de campo.....	42

5 CONCLUSÕES.....	52
ANEXOS.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Principais forças que atuam no trator em um plano inclinado.....	19
2 Representação esquemática de uma mesa de seno com um bloco padrão de 50 mm (Metrologia,1997).....	28
3 Vista interna do clinômetro observando-se o pêndulo metálico (a), o circuito eletrônico (b), cabo de saída do sinal (c) e eixo de rotação e potenciômetro (d)	30
4 Talude 1 e o tráfego do trator com inclinação à direita durante o ensaio dinâmico.....	35
5 Talude 2 durante uma das passadas do trator no ensaio de campo.....	36
6 Trator durante uma passada no talude 3, observando-se na parte inferior direita a rampa marcadora utilizada para produzir um pico de sinal.....	37

7	Curva de calibração do clinômetro com inclinação à esquerda.....	41
8	Curva de calibração do clinômetro com inclinação à direita.....	41
9	Perfil do talude 1 obtido do levantamento topográfico com o nível óptico; as linhas longitudinais correspondem ao ponto de contato dos dois pneus traseiros com o solo.....	43
10	Perfil do talude 2 obtido do levantamento topográfico com o nível óptico; as linhas longitudinais correspondem ao ponto de contato dos dois pneus traseiros com o solo.....	43
11	Perfil do talude 3 obtido do levantamento topográfico com o nível óptico; as linhas longitudinais correspondem ao ponto de contato dos dois pneus traseiros com o solo.....	44
12	Leituras do ângulo de inclinação do talude 1 à direita e à esquerda em relação à referência.....	45
13	Leituras do ângulo de inclinação do talude 2 à direita e à esquerda em relação à referência.....	45
14	Leituras do ângulo de inclinação do talude 3 à direita e à esquerda em relação à referência.....	46

LISTA DE QUADROS

	Página
1 Limite de estabilidade lateral de tratores agrícolas em relação à inclinação.....	7
2 Erros permissíveis para blocos padrão em relação à sua classe e dimensão.....	54

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Medidas e número de blocos padrão empregados na calibração estática do clinômetro onde cada medida corresponde a um ângulo de inclinação da mesa de seno.....	33
2 Parâmetros estatísticos descritivos para as diferenças entre os tratamentos e a referência.....	47
3 Síntese da análise da variância para os valores do coeficiente de variação, teste T, correlação e significância para as comparações entre ângulos da referência e aqueles dos diferentes tratamentos	48
4 Síntese da análise da variância dos seis cenários obtidos no ensaio de campo.....	55
5 Erro entre a leitura do clinômetro e o levantamento topográfico para os taludes 1, 2 e 3.....	56

TOMBAMENTO LATERAL DE TRATORES AGRÍCOLAS: AVALIAÇÃO DO USO DE UM CLINÔMETRO PARA SUA PREVENÇÃO

Autor: SERGIO PEREIRA DE SOUZA

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ PAULO MOLIN

RESUMO

Os inúmeros acidentes de trabalho na agricultura têm exigido esforços de diversos setores no sentido de torná-los menos freqüentes, devido aos problemas que acarretam à atividade agrícola e na intensidade em que ocorrem. Em alguns países estes acidentes lideram os registros de acidentes fatais, acompanhados de perto dos registros observados nas atividades de mineração e da construção civil. Dentre os diversos tipos de acidentes na atividade agrícola, os de maior ocorrência são os que envolvem tratores agrícolas, em especial, os do tipo tombamentos. Estes, por sua vez, podem ser frontais (empinamento) ou laterais. Os tombamentos laterais são os mais freqüentes, com 75% do total dos registros de tombamentos. Como proposta de prevenção a esse tipo de acidente avaliou-se a possibilidade do emprego de um clinômetro, disponível no Departamento de Engenharia da ESALQ-USP. Este instrumento mede ângulo de inclinação e têm apresentado grande aplicação em diversas áreas. Inicialmente foram determinadas suas características estáticas

tais como curva de calibração, sensibilidade estática, faixa de leitura, erros e histerese. Para tanto utilizou-se uma mesa de seno. Na seqüência, esse clinômetro foi instalado em um trator e avaliou-se seu comportamento em três taludes de inclinações distintas. Dos seis cenários criados nos ensaios dinâmicos, em apenas um deles, onde houve inclinação à direita e na maior declividade, o clinômetro não apresentou semelhança estatisticamente significativa com a referência. O clinômetro instalado em um trator reproduziu os taludes a que foi exposto, indicando ser um instrumento útil na prevenção de tombamento lateral de tratores na medida em que alerta o operador quanto à exposição ao risco.

OVERTURNING OF TRACTORS: EVALUATION OF A CLINOMETER FOR ITS PERVENTION

Author: SERGIO PEREIRA DE SOUZA

Adviser: Prof. Dr. JOSÉ PAULO MOLIN

SUMMARY

Work accidents in agriculture have required efforts of many sectors to make them less frequent, due to problems they bring to the activity and in the intensity that they occur. In some countries farm accidents lead the fatalities, followed by mining and civil construction activities. Among the diverse types of accidents in agriculture the most frequent involves farm tractor, specially overturning by front or side. This work aimed to evaluate the use of a clinometer as a sensor for overturning prevention. It was initially evaluated under static conditions determining its calibration curve, static sensibility, span, errors and hysteresis, by using a sine table. In the sequence, the clinometer was installed in a tractor and evaluated in three distinct slopes under left and right pending. In only one of the six treatments the clinometer presented significant statistical difference with the reference. The clinometer installed in a tractor was able to detect the slopes indicating that it may be useful on overturning prevention as it alerts the operator on risk exposures.

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, quando o homem deixou seus hábitos nômades, a agricultura surgiu como suporte para a sua sobrevivência. As transformações, com maior ou menor intensidade, por que tem passado até os dias de hoje, tornaram a atividade agrícola como uma das mais versáteis em relação a recursos, equipamentos e formas de exploração.

Assim, a atividade agrícola incorporou técnicas e máquinas no processo produtivo, que cresceu num ritmo muito acelerado, principalmente a partir da segunda metade do século XX. A contínua necessidade de produzir alimentos para as populações cada vez mais numerosas tem ampliado as fronteiras agrícolas e exigido a utilização de técnicas que resultem na otimização dos meios e recursos empregados na produção agrícola.

No Brasil, conjuntamente à crescente intensificação da exploração agrícola, também ocorreu um esvaziamento do campo com sensível redução da disponibilidade de mão-de-obra. Isso impôs a necessidade do emprego da mecanização na produção de diversas culturas.

Uma das grandes alavancas da atividade agrícola é a enorme versatilidade das máquinas e implementos agrícolas que diversificam e ampliam as possibilidades de emprego de técnicas de exploração das culturas. Porém, não obstante a sua contribuição ao desempenho da atividade agrícola, deve-se considerar também que as máquinas agrícolas, em especial os tratores, estão freqüentemente presentes nos registros de acidentes no meio agrícola.

No Brasil, praticamente não existem estatísticas sobre acidentes com tratores agrícolas. No entanto, sabe-se que países como Estados Unidos e

alguns países da União Europeia como a Espanha e a Alemanha, já há bastante tempo identificaram a grande participação dos tratores nos registros de acidentes na atividade agrícola.

Uma das justificativas para a presença quase constante dos tratores agrícolas nos registros de acidentes é devida à sua grande versatilidade e ao fato de que boa parte da maquinaria agrícola funciona acoplada aos tratores. Além disso, o próprio trabalho agrícola, na maioria das vezes, é executado em áreas não planas, levando o operador a exceder os limites de segurança, dando assim origem ao mais comum dos acidentes dessa natureza que é o tombamento lateral.

Assim, este trabalho visa analisar a possibilidade de empregar-se um modelo específico de clinômetro em tratores agrícolas, de forma a monitorar o ângulo de inclinação no qual o trator agrícola opera. Com isso propõe-se agir de forma a reverter o perigo iminente, o que se constituiria numa contribuição à redução desse tipo de acidente.

Para tanto analisou-se o funcionamento de um clinômetro equipando um trator operando em diferentes taludes transversais. Quantificou-se a forma com que ele reproduziu a condição de inclinação a que o trator era submetido e discutiu-se a aplicabilidade desse tipo de sensor na prevenção de acidentes relacionados a tombamento lateral de tratores agrícolas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O conteúdo deste tópico foi dividido em temas correlatos ao tombamento lateral de tratores agrícolas de pneus. Inicialmente trata-se a questão descrevendo sua ocorrência no Brasil e em outros países, a forma como se desencadeia, quais os principais elementos que predispõe uma operação agrícola a esse risco e também os principais desdobramentos de uma eventual ocorrência desse tipo de acidente. Também é abordada a questão da relevância das estruturas de proteção contra capotagem na redução dos registros de fatalidades em casos de tombamentos laterais de tratores agrícolas.

Outro tema abordado são os modelos preditivos da declividade limite para a operação de tratores agrícolas, onde alguns modelos são descritos de forma a verificar-se a evolução que vem ocorrendo nesse tipo de análise. A última etapa explora a aplicação geral dos diversos modelos de clinômetros e a calibração de instrumentos.

2.1 Acidentes com tratores agrícolas: causas e conseqüências

Phipps et al. (1959), analisando a questão dos acidentes com tratores agrícolas, consideram que uma das causas mais freqüentes de registros de ferimentos e fatalidades, deve-se à prática de se operar essas máquinas em áreas inclinadas ou com declives pouco evidentes. A cobertura vegetal e outras

barreiras, impedem o operador de fazer um julgamento mais correto da situação em que se encontra.

Palacio (1975) analisa os riscos de tombamento lateral de tratores agrícolas, operando transversalmente em declives e a qualidade do trabalho de aração realizado nessas condições. Considera que em áreas com declividade variando de 30% a 35%, ocorre uma redução da estabilidade do trator, predispondo-o ao tombamento lateral, uma vez que a soleira do sulco apresenta maior quantidade de torrões. O autor aponta esse valor como sendo o limite técnico de declividade no qual o trator deva executar uma operação agrícola.

Observando as principais causas que se relacionam aos acidentes com tratores agrícolas, Silveira (1979) enumera diversos itens que devem ser seguidos pelos operadores, já que considera que as falhas humanas são as principais responsáveis pelos acidentes, em detrimento das falhas mecânicas. Também considera que os tratores possuem peças pesadas, dispostas em cotas relativamente altas, o que contribui para que o centro de gravidade também seja elevado, o que interfere negativamente, na estabilidade do trator.

Balastreire (1979), cita quatorze possíveis formas de acidentes com tratores agrícolas. É apontado em primeiro lugar o tombamento lateral, destacando também a complexidade de se conhecer o limite de declividade para operações agrícolas, principalmente em condições dinâmicas, onde fatores imprevisíveis como montículo de cupins e buracos no solo, concorrem de forma a potencializar ou mesmo desencadear o tombamento lateral dos tratores.

Spencer et al. (1983) consideram que o principal problema em relação aos tombamentos laterais de tratores agrícolas é a falta de conhecimento dos limites de inclinação para uma operação segura, e também que esses acidentes ocorrem principalmente devido à perda de controle do trator por parte do operador. Citam ainda que a declividade na qual ocorre a perda de controle

depende de diversos fatores como a configuração da máquina, condições do terreno e dos pneus traseiros.

Abordando a questão da estabilidade de tratores agrícolas operando em áreas inclinadas, Hunter (1985) considera que deve-se aprofundar estudos acerca da influência de reboques tracionados pelo trator, em especial os tanques, uma vez que geralmente transportam fluidos, que apresentam uma oscilação muito grande em condições cinemáticas. Isso afeta diretamente o centro de gravidade do trator, podendo contribuir decisivamente para a ocorrência de um tombamento lateral.

Segundo Khachatryan (1985), diversos países da Europa, como Bulgária, Áustria, Suíça e França exploram áreas inclinadas que oferecem grandes dificuldades aos trabalhos agrícolas, principalmente durante o preparo do solo. Essas operações, realizadas perpendicularmente ao declive, expõem o trator a um maior risco de tombamento lateral.

Descrevendo as vantagens de trabalhar-se com trator com tração 4X4 em declives em relação aos de tração 4X2, Owen (1986), considera que muitos tombamentos de tratores 4X2 TDA (Tração Dianteira Auxiliar), devem-se ao fato dos operadores não acionarem adequadamente essa tração, quando operando em declives acentuados. Assim, o autor propôs que os operadores fossem alertados do risco a que estão submetidos através de um contato elétrico acionado com mercúrio, calibrado para induzir um sinal sonoro quando fosse atingida a declividade de 12°. Dessa forma o operador acionaria a tração 4X2 TDA, o que tornaria a operação mais segura.

Hunter (1986) considera que a estabilidade de máquinas agrícolas, principalmente dos tratores, tem sido estudada com muita freqüência por sua relação direta com tombamentos laterais. Esses acidentes causam, em geral, ferimentos graves ou mesmo a morte dos operadores envolvidos. O autor destaca que apesar disso os tratores são relativamente estáveis, sendo que algumas máquinas e implementos tracionados pelo trator, como carretas, são geralmente mais instáveis, aumentando o risco de tombamento dos tratores.

Por isso cita a importância de se conhecer o centro de gravidade dessas máquinas e implementos, principalmente quando estiverem transportando fluidos, que devido ao comportamento dinâmico tendem a influir na estabilidade dos tratores de modo a intensificar o risco de tombamentos lateral.

Robin (1987) considera que mesmo sendo um veículo que não trabalha em velocidades altas, o trator agrícola é perigoso, principalmente se operado de forma inadequada ou por operadores sem necessário treinamento. Sua estabilidade tem relação direta com sua massa, altura do centro de gravidade e largura do rodado, além da velocidade em que é operado. Aponta também, como principais causas de tombamento lateral a elevação da altura do centro de gravidade do trator pela utilização de implementos, pela presença de pequenas saliências ou reentrâncias no solo, tais como valetas, pedras, tocos, raízes e cupinzeiros, na faixa de tráfego do trator. O autor aponta duas ações básicas que devem ser adotadas para redução da ocorrência de acidentes e para minimizar seus efeitos. Uma dessas medidas seria um melhor treinamento para os operadores de tratores agrícolas. Outra medida seria a inserção das Estruturas de Proteção Contra Capotagem (EPCC) ou “Rollover Protective Structures” (ROPS) nos tratores agrícolas, pois reduzem a possibilidade de uma fatalidade no caso de tombamento lateral.

Recomendendo algumas normas básicas para segurança, Atares & Blanca (1989), ressaltam que ao trabalhar em áreas inclinadas, o operador deve estar ciente do risco dessa situação e da possível perda de estabilidade. Como consequência deve agir de forma prudente de modo a evitar o tombamento do trator. Os autores fazem a mesma recomendação para o caso de operações em terraços, próximo a barrancos, como também áreas com buracos, que expõem igualmente o trator a uma condição de risco.

Dias et al. (1992), abordando as principais causas de acidentes envolvendo tratores agrícolas, consideram que elas são motivadas principalmente por velocidade alta durante as operações, operar rebocando carretas em fortes aclives e também imprudência do operador em estradas.

Incluem ainda a imperícia ou o despreparo do operador para a atividade. A todas essas causas pode ainda estar associada, como agravante, o consumo de bebida alcoólica pelo operador. |

Hunter (1992), considera que o trator, pela forma como é operado nos trabalhos agrícolas, muitas vezes em áreas inclinadas, permite que seja excedido facilmente o limite de segurança, o que o torna bastante vulnerável a acidentes, principalmente tombamentos laterais. O Quadro 1 mostra dados adaptados do autor que descreve algumas situações que podem ocorrer com a máquina agrícola, de acordo com a declividade do terreno na qual esteja sendo operada.

Declividade		Descrição	Situações de instabilidade da máquina
(°)	(%)		
0	0	plano	trator com velocidade excessiva
5	9	suave	trator realizando curva, com equipamento montado, como roçadora
10	18	médio	trator com carga no carregador frontal
15	27	declivoso	trator com pulverizador montado ou vagão forrageiro
20	36	muito declivoso	tracionando reboque, como uma calcariadora
25	47	excessivo	trator com rodado padrão
30	58	extremo	trator com rodado mais largo

Adaptado de Hunter (1992).

Quadro 1 - Limite de estabilidade lateral de tratores agrícolas em relação à inclinação.

O autor também ressalta que existem três condições básicas para que ocorra a perda de estabilidade: ultrapassar o ângulo limite, excedendo assim o limite de estabilidade estática; trafegar com velocidade excessiva e trabalhar sobre solos de superfície muito irregular.

Inoue (1997), considera que o conhecimento das propriedades físicas dos pneus, como as diversas deformações a que estão sujeitos, é importante para o conhecimento da estabilidade lateral de tratores agrícolas e permitem que se conheça as variações nas dimensões do trator. Essas deformações impõem uma alteração na bitola efetiva, além de influir na redução da altura do centro de gravidade do trator. Também ressalta que a constante de rigidez e o coeficiente de deslizamento lateral dos pneus têm sido considerados por influírem na estabilidade lateral dos tratores agrícolas.

Gil (1998), considera que entre as múltiplas causas que colocam a atividade agrícola como a que mais causa acidentes fatais, estão principalmente as de natureza humana. O autor enumera fatores humanos que exercem grande influência nas falhas e acidentes, como a idade do operador, seu estado físico e mental, além da inexperiência com a máquina que opera.

Tosello (1960), abordando aspectos técnicos e econômicos relacionados à mecanização agrícola, considera que não obstante a escassez de dados acerca dos acidentes que ocorrem na atividade agrícola no Brasil, aponta como principais formas de acidentes os tombamentos e problemas de frenagem. Cita que nos Estados Unidos o número de fatalidades registrado anualmente, na época, era de 54 mortes para cada grupo de 100.000 trabalhadores, enquanto na indústria ocorriam 15 mortes para cada 100.000 trabalhadores.

Apesar de considerar que a média anual de fatalidades na agricultura, no estado de Iowa, nos Estados Unidos, diminuiu no período entre 1932 a 1936, Barger et al. (1963) citam que o mesmo não aconteceu com os registros de fatalidades devido a acidentes envolvendo tratores e máquinas agrícolas. Esses aumentaram sua participação nos acidentes na agricultura, no período de 1932 a 1959, de 27% para 57% do total registrado. Também consideram que em

geral os acidentes eram causados por descuido dos operadores, ressaltando que, para a época, uma maior preocupação com a segurança no projeto dos tratores poderia contribuir para a redução da exposição à condição de risco e conseqüentemente reduzir o número de acidentes dessa natureza.

Promersberger et al. (1971), abordando a questão dos acidentes com tratores agrícolas, com base em dados divulgados pelo "National Safety Council" (NSC) nos Estados Unidos, citam que este tipo de acidente tem aumentado. Os autores atribuem, em parte, ao desconhecimento do operador de uma situação de risco, e também por direção descuidada. Salientam que mais de 30% das vítimas fatais, de um total de 317 casos estudados pelo NSC, envolveram jovens com menos de 20 anos de idade e muitos desses com menos de 5 anos de idade.

Smith & Liljedahl (1972) com base em dados do NSC, apontam tombamento lateral como sendo predominante nos acidentes envolvendo tratores agrícolas, com uma ocorrência de 67%, contra 33% para os casos de tombamento frontal. Ainda, segundo esses autores, em 1967 registrou-se 1.000 casos de fatalidades na atividade agrícola nos Estados Unidos, sendo que 60% deles foram atribuídos a tombamentos laterais e frontais.

Segundo Hunt (1973), apesar das precauções, a atividade agrícola nessa época registrava muitos acidentes. Nos Estados Unidos, registravam-se 2.000 casos fatais além de 200.000 acidentes com ferimentos severos por ano. Também ressalta que em 34% dos acidentes havia necessidade de internação hospitalar e que uma média de 10 dias de trabalho são perdidos devido a ferimentos e lesões decorrentes desses acidentes. Com o objetivo de preveni-los, o autor considera que diversas ações devem ser seguidas, como reduzir a velocidade do trator quando trabalhando lateralmente em declives e quando manobrando em curva em superfície muito irregular e de pouca aderência.

A Fundacentro (1978) cita estatísticas da Organização Mundial de Saúde sobre acidentes em diversas atividades, referentes ao ano de 1972. Na, então, República Federal da Alemanha registrou-se 2,5 milhões de acidentes para um

total de 26 milhões de trabalhadores, o que corresponde a um percentual de 9,6% de acidentes em relação ao número total de trabalhadores. Já a França, com 13 milhões de trabalhadores, apresentou 1,1 milhão de acidentes, índice de 8,5% de acidentes. O Brasil, no mesmo período, de um total de 8,3 milhões de trabalhadores, registrou 1,5 milhões de acidentes, o que resulta num índice de 18,12%. Também ressalta que, dos fatores desencadeadores de acidentes, os relacionados diretamente com o operador são denominados de atos inseguros e os relacionados com o ambiente de trabalho e as mais diversas falhas que podem ocorrer nas máquinas e equipamentos empregados, são as condições inseguras. Ressalta ainda que, segundo levantamento feito pela Universidade de Ohio, nos Estados Unidos, as falhas humanas são responsáveis por 80% dos registros de acidentes fatais, enquanto que as falhas mecânicas são responsáveis por 20% desses acidentes.

Analizando a questão da prevenção de acidentes no trabalho em diversas atividades, Mezomo (1985) considera que todo trabalho apresenta um certo risco, que pode ou não ser aparente. Estando o trabalhador habituado a conviver com o acidente, ele poderá ocorrer com conseqüências das mais diversas possíveis. Segundo o autor, os países industrializados estão mais sujeitos à ocorrência de acidentes. Cita que só nos Estados Unidos estima-se em 20 a 25 milhões os registros anuais de acidentes.

Aherin et al. (1992) tratam o problema dos acidentes no trabalho como uma questão de saúde pública, pois relatam que há algumas décadas as doenças infecciosas eram as maiores responsáveis pelos registros de mortes nos Estados Unidos. Segundo estimativas, 95.000 norte-americanos morreram no ano de 1990 em conseqüência de acidentes ou ferimentos em diversas atividades. Também consideram que, dos registros de fatalidades na agricultura nos últimos quatro anos, os tratores despontam como um forte elemento envolvido nesses acidentes, seguido por outras máquinas agrícolas.

† Duncan et al. (1994), analisando os riscos de acidentes nas atividades agrícolas, consideram que nenhuma outra máquina agrícola está tão

relacionada com acidentes como os tratores agrícolas. Também ressaltam que os tombamentos são as principais formas de acidentes, principalmente os tombamentos laterais, responsáveis por mais de 80% dos registros de tombamentos. As principais causas desses tombamentos seriam a operação em terrenos inclinados, com obstáculos que muitas vezes o operador desconhece ou não consegue identificar em tempo suficiente para evitar o acidente. Apesar dos tombamentos laterais ocorrerem geralmente em áreas inclinadas, os autores consideram que também podem ocorrer em solo plano, principalmente se o operador realizar curvas com velocidade excessiva.

Marquez (1995) considera que a maior parte dos acidentes que ocorrem na agricultura tem relação direta com o emprego das diversas máquinas agrícolas. Cita que na Espanha, anualmente morrem cerca de 100 operadores em acidentes com o uso de máquinas agrícolas. Quase a metade ocorre em consequência de tombamento lateral de tratores não equipados com estruturas de proteção contra capotagem. Ressalta também que as máquinas agrícolas apresentam um risco potencial e mesmo as fabricadas com os cuidados relacionados à segurança devem ser operadas de forma mais cuidadosa, pois a forma como são empregadas contribui de forma decisiva para ocorrência de acidentes.

Citando dados de 1989, divulgados pelo Conselho Nacional de Segurança (NSC) dos Estados Unidos, Paccola (1996) mostra que o número de vítimas fatais na agricultura apresenta uma taxa de 40 mortes para cada grupo de 100.000 trabalhadores. Já, para as outras atividades, a taxa é de 9 mortes para cada 100.000 trabalhadores.

Segundo dados divulgados pelo Illinois Farm Related Deaths (1999), de 1986 a 1997, de um total de 407 registros de fatalidades ocorridos em trabalhos agrícolas, 200 envolveram diretamente tratores agrícolas. Desses, 117 corresponderam a tombamentos laterais, confirmando assim predominância dessa modalidade nos registros totais de acidentes envolvendo tratores agrícolas.

De um total de 508 acidentes de tombamentos de tratores agrícolas ocorridos na Suécia, entre 1957 e 1990, mais da metade resultou na morte do operador. No estado norte-americano da Flórida, 37% dos registros de fatalidade ocorridos na agricultura em 1992, relacionavam-se com tratores ou máquinas agrícolas, (Unesp Rural, 2000).

Rodrigues & Silva (1986), analisando a incidência de acidentes de trabalho em relação à modernização da agricultura brasileira, consideram que o trator agrícola é responsável pelos maiores índices de acidentes. Dentro desses acidentes envolvendo tratores agrícolas, ressaltam que o tombamento lateral foi responsável por 70% dos registros, seguido do excesso de carga com 15%, queda do operador com 5,5%, colisão com outro veículo com 3% e implementos de arrasto ou reboque com 1%.

Analisando a questão dos acidentes de trabalho no Brasil, Mendes (1995) demonstra que vem aumentando os registros de fatalidades em decorrência de acidentes de trabalho. Em 1970, registrou-se 2.232 fatalidades, 4.824 em 1980 e em 1990 um total de 5.355, o que significa mais de 100% de aumento de fatalidades em duas décadas. O autor menciona que da execução de trabalhos por períodos prolongados em máquinas agrícolas, que em geral não oferecem uma posição agradável ao operador, podem advir câimbras e mialgias que poderão dificultar os movimentos do operador, predispondo-o a acidentes. Como estratégias de prevenção de acidentes de trabalho, considera importante priorizar ações que reduzirão com mais efetividade as lesões. Conclui que deve-se dar preferência a medidas que protejam de forma automática, pois assim haverá maior efetividade na prevenção, em relação àquelas que dependam da participação do operador.

Segundo Mialhe (1996), o nível de risco a que estão submetidos os operadores justificam a obrigatoriedade dos ensaios de certificação para estruturas de proteção contra capotagem. Cita os exíguos, mas significativos dados estatísticos brasileiros divulgados pela Coordenadoria de Assistência Técnica e Integral (CATI). Conforme expressam esses dados, referentes ao ano

agrícola de 1975/76, constatou-se um total de 110.700 acidentes para 28.300 propriedades agrícolas, sendo que desses, 13.700 são relativos a acidentes com tratores agrícolas, resultando na relação de 1 morte para cada 7 acidentes com tratores.

Dias et al. (1993a) destacam a importância de se identificar as principais causas de acidentes que envolvem os tratores agrícolas, considerando o grande prejuízo que acarretam ao processo produtivo. Os acidentes são um grande infortúnio para a atividade agrícola pelo valor do capital humano a ele relacionado. Também são relevantes os custos que envolvem toda a questão do tratamento dispensado ao operador acidentado. Dessa forma o empresário rural irá arcar com grandes prejuízos na eventualidade de um acidente com tratores, tanto em relação aos custos diretos como indiretos, advindos do processo de recuperação do operador, além da própria máquina envolvida no acidente.¹

Segundo Cicco (1984), as ações que visam a prevenção de acidentes de trabalho, devem ater-se principalmente em identificar, analisar e fazer a correta avaliação dos riscos de acidentes que poderão trazer prejuízos humanos e materiais a determinada empresa. Também ressalta que os termos custo direto e custo indireto devam ser substituídos por custo segurado e custo não segurado, respectivamente. O primeiro refere-se ao custo coberto pelas empresas de seguro com os acidentes de trabalho e o segundo é referente à cobertura dada pela própria empresa onde se registrou o acidente.

Palmer (1976) considera que a ergonomia e os conceitos que a ela se relacionam, têm íntima relação com o melhor entendimento dos aspectos que envolvem os acidentes, nas mais diversas atividades humanas. O homem não está livre de cometer erros na execução dessas atividades, principalmente quando trabalhando sob tensão. Desses erros cometidos na execução das atividades, poderão advir acidentes de gravidade proporcional ao risco inerente à própria atividade. Assim, considera que esses erros poderão ter uma redução pela adoção dos preceitos da ergonomia, ou seja, conhecimentos na área da

psicologia, anatomia e fisiologia, que envolvem o homem e o seu ambiente de trabalho. Também, segundo o autor, é importante que nos projetos das máquinas, deva-se atentar para a relevante questão das limitações humanas, de modo a reduzir os acidentes na execução das mais diversas atividades. ¶

2. 2 Estruturas de proteção contra capotagem: aspectos básicos

Muitos dos acidentes que acontecem ao se trabalhar com maquinaria agrícola, são devidos à falta de atenção e de cuidado por parte do operador. Os tratores agrícolas estão presentes na maioria dos acidentes na agricultura devido à sua versatilidade e ampla utilização. Por isso são muito importantes as Estruturas de Proteção Contra Capotamento (EPCC) que protegem o operador no caso de tombamentos (Smith & Wilkes, 1979).

Konrad (1980), analisando a importância da presença de cabinas em tratores agrícolas, ressalta a necessidade de estabelecer uma legislação no país que obrigue a sua inserção nos modelos comercializados, pois são estruturas de proteção contra capotagem de eficiência comprovada em países que a adotaram. Também segundo esse autor, as cabinas propiciam maior conforto aos operadores durante os trabalhos agrícolas, os quais considera favorecerem situações de estresse permanente devido ao ambiente e condições em que são executados. Cita também que em países da União Européia, Estados Unidos e Canadá, muitas vezes o operador da máquina agrícola é o próprio agricultor, o que torna a inserção de cabinas nos tratores agrícolas um argumento mais convincente, além daqueles impostos por severas condições climáticas.

Spencer & Owen (1981) consideram que a introdução das EPCC em tratores agrícolas foi marcada por uma sensível redução nos registros de fatalidades devidas a acidentes por tombamentos desses tratores, destacando também que estas ocorrem geralmente em áreas inclinadas. Também

ressaltam que a presença dessas estruturas de proteção não irá impedir que um acidente ocorra e sim que seus efeitos sobre o operador sejam menos severos. Os autores destacam porém, que a presença da EPCC nos tratores agrícolas eleva o centro de gravidade do trator o que diminui o limite de inclinação no qual ele poderia operar com segurança.

Considerando a gama de fatores concorrentes para o desencadeamento de um tombamento lateral envolvendo tratores agrícolas, Robin (1987) aponta duas ações que devem ser adotadas para redução de sua ocorrência e minimização de seus efeitos. A primeira no que se refere ao operador no sentido de dar-lhe treinamento com vistas à prevenção. Outra ação que visa a diminuir os efeitos danosos de um tombamento lateral do trator é com relação ao emprego de EPCC de comprovada eficiência na proteção do operador. Para corroborar essa afirmativa, o autor cita o exemplo bem sucedido da República Federal da Alemanha, onde a adoção dessas duas ações resultou na diminuição dos registros de acidentes fatais de 40 para 1 morte para cada grupo de 100.000 operadores. Essa redução foi verificada entre as décadas de 1960 a 1970. Essas estruturas, conclui o autor, podem se apresentar na forma de cabines ou arcos de proteção, desde que sejam submetidas a ensaios descritos em diversas normas como as da “International Organization for Standardization” (ISO), da “American Society of Agricultural Engineers” (ASAE) e também da “Comunidade Econômica Européia” (CEE) e “Organization for Economic Co-operation and Development” (OECD).

Abordando a questão da segurança na operação de tratores agrícolas de pneus, Silveira (1988) destaca a importância das EPCC na redução dos danos causados ao operador no caso de tombamento do trator e ressalta a necessidade da obrigatoriedade de sua instalação nos tratores nacionais. Essas estruturas se resumem em cabines ou mesmo armações em aço cujo objetivo é o de proteger os operadores na eventualidade de um tombamento, citando que os toldos, comuns nos tratores nacionais, simplesmente protegem o operador de chuva e da insolação. Como forma de sua fixação ao chassi do trator, o

autor aponta que em geral é feita através de dois ou de quatro pontos de fixação, podendo também ser totalmente fundida à cabine e que todo trator equipado com uma EPCC deve ter cinto de segurança de contenção.

Buffolo & Silva (1988), discutindo procedimentos para ensaios de cabines e arcos de segurança para tratores agrícolas, descrevem 4 métodos para o ensaio de arcos de segurança e cabines como os cálculos teóricos, o de tombamento real do trator além do ensaio estático e do ensaio dinâmico. Cada um deles apresenta vantagens e desvantagens, principalmente em relação aos custos envolvidos e a operacionalidade do método.

Goering (1992) considera que as EPCC surgiram a partir da década de 1950 e têm tido bastante êxito na proposta de redução do número de fatalidades nos casos de tombamentos laterais de tratores agrícolas. Considera que dada à necessidade do centro de gravidade dos tratores ser alto para o trabalho com as diversas culturas o mesmo torna-se vulnerável a acidentes do tipo tombamento lateral. O autor menciona que as normas da ASAE determinam que essas estruturas deverão deformar-se o suficiente para absorver parte da energia advinda do impacto do trator contra o solo, mas não o bastante para permitir que o mesmo venha a ser esmagado pela própria estrutura.

Yamashita (1998) aponta o tombamento de tratores agrícolas, incluso no do grupo de acidentes causados por máquinas e implementos agrícolas, como um tipo de acidente bastante comum no Brasil e em geral com conseqüências fatais. Segunda a autora, não existe no País uma legislação que determine a obrigatoriedade do uso de estruturas de proteção contra capotagem, item que ameniza os efeitos desse tipo de acidente, reduzindo consideravelmente os riscos de fatalidade.

Freeman (1999), descreve a importância de se equipar os tratores com estruturas de proteção contra capotagem pois constituem-se numa proteção relevante aos operadores em caso de tombamentos. Também apontam que diversos estudos têm confirmado que o tombamento lateral de tratores é a

principal forma de acidente com tratores agrícolas com inúmeros registros de fatalidades nos Estados Unidos, tanto que os maiores fabricantes adotaram voluntariamente a partir de 1985 a EPCC e o cinto de segurança como equipamentos de série. Apesar disso o problema nos Estados Unidos persiste, uma vez que a idade média da frota dos cerca de 4,7 milhões de tratores em uso é de 23 anos. Desse total, cerca de 60% não estão equipados com EPCC.

2.3 Modelos para predição da declividade limite

Davis & Rehkugler (1974) consideram que modelos matemáticos e modelos em escala podem ser empregados para o estudo do tombamento de tratores agrícolas. A complexidade e custos envolvidos na utilização de tratores em escala real dão um grande respaldo ao seu emprego.

Spencer & Gilfillan (1976) analisaram os efeitos da rugosidade do solo em áreas inclinadas sobre a estabilidade de tratores agrícolas. Assim, consideram que os valores da declividade limite obtidos através de modelos de predição só devem ser empregados com uma margem de segurança, de modo a considerar os efeitos da rugosidade da superfície do solo na estabilidade do trator.

Analisando as condições nas quais ocorrem o tombamento lateral e a perda de controle da direção do trator, Spencer (1978) considera que a perda de adesão dos pneus do trator com o solo é determinante para que esses dois eventos venham a ocorrer. Assim, o autor desenvolveu um modelo teórico para predição do limite de declividade e da perda de controle do trator no qual foi feita validação através de experimentos em escala natural com o conjunto trator-implemento de emprego mais comum.

Chisholm (1979) descreve a validação de um modelo de simulação computacional para predição dos efeitos sobre a EPCC perante um tombamento lateral. Para essa validação empregou 30 experimentos de

tombamento real de um trator agrícola que foi induzido ao tombamento em uma rampa de 2 m de altura de forma a reproduzir diversas situações. Nesse trator foi inserida uma instrumentação capaz de avaliar a energia absorvida pela EPCC durante o tombamento real, confrontando-se com dados da simulação computacional. Com base nesses ensaios a simulação mostrou-se apta à predição do comportamento dinâmico do trator quando de um tombamento lateral.

Mialhe (1980) cita um modelo de determinação de declividade máxima para operações com tratores agrícolas em condições estáticas e recomenda que nas condições reais de campo o ângulo limite de inclinação deva ser a metade do valor encontrado com esse modelo matemático. Isto se deve ao fato das condições reais de campo serem bem mais severas e envolverem outras variáveis como a constante elástica dos pneus, irregularidades naturais do terreno e velocidade de trabalho. O modelo proposto pelo autor baseou-se no esquema da Figura 1, que descreve de forma simplificada as principais forças atuantes no trator, quando se deslocando em um terreno inclinado considerando rígidos seus pontos de apoio ao solo.

Onde:

CG = centro de gravidade do trator;

S = bitola do trator, m;

Y = altura do centro de gravidade do trator, m;

W = projeção do peso do trator, normal ao plano em nível;

W_h = componente do peso paralelo ao plano inclinado de apoio;

W_v = componente do peso normal ao plano inclinado de apoio.

n e m = pontos de apoio dos pneus traseiros, esquerdo e direito, respectivamente;

α = ângulo de inclinação do plano de apoio, e,

z = distância do centro de gravidade do trator ao centro do pneu traseiro esquerdo.

Figura 1 - Principais forças que atuam no trator em um plano inclinado.

Com base nesse esquema o autor descreve um modelo para ser empregado na predição da declividade limite de operação do trator, representado pela equação 1.

$$d = \frac{S}{2Y} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

d = declividade do plano de apoio, % ;

S = bitola do trator, m;

Y = altura do centro de gravidade do trator, m.

Em condições dinâmicas, o autor considera que se adote apenas 50% do valor obtido com o modelo, devido ao maior risco envolvido.

Santos (1983), desenvolveu um modelo matemático para a determinação da estabilidade estática de tratores de pneus para as condições de bitolas iguais, bitolas diferentes e também para tratores triciclos. Para isso o autor partiu da premissa de que o trator encontra-se inscrito dentro de um prisma reto, tendo a cota do centro de gravidade como altura e os vértices da base como sendo os pontos de contato do trator com o solo. Assim, para o trator que tivesse bitolas iguais, a figura que o envolveria seria um bloco retangular. Caso fosse de bitolas diferentes, seria envolvido num prisma trapezoidal e no caso de um trator triciclo, seria inscrito num prisma de base triangular. Sintetizando as análises matemáticas intermediárias, o modelo proposto pelo autor é descrito pela equação 2.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b \times L - x(b - c)}{2L \times y} \quad (2)$$

Onde:

$\operatorname{tg} \alpha$ = declividade limite;

b = bitola traseira;

c = bitola dianteira;

L = distância entre eixos;

x = abscissa do centro de gravidade;

y = ordenada do centro de gravidade;

Spencer et al. (1985) descreveram um método de determinação do limite de estabilidade estática no qual os tratores agrícolas podem operar. É feito de forma prática, permitindo seu emprego sem a necessidade de complexas simulações em computadores ou dispendiosos ensaios reais de campo. A técnica consiste em fazer-se medições através de uma célula de carga, da força peso aplicada ao solo pelo rodado traseiro do lado superior ao declive. Obtém-se, dessa forma, uma série de pontos que permitem que seja criada uma curva, determinando-se então o ângulo crítico (β_s) no qual essa carga aplicada tende a zero, onde o limite de estabilidade estaria próximo de ser atingido. Para o emprego dessa técnica os autores consideram que tanto em declives reais como em terrenos planos pode-se emprega-la, sendo que nesse último caso utiliza-se uma balança do tipo plataforma para inclinar o trator.

Dias et al. (1993b) descrevem um modelo de avaliação do limite de declividade para tratores agrícolas sob condições estáticas e recomendam que este modelo deva substituir outro proposto por Mialhe (1980), que considera o trator como um corpo rígido e apoiado em quatro pontos, não considerando a deformação dos pneus, que tem influência direta na estabilidade lateral dos tratores. O modelo proposto pelos autores é representado pela equação 3.

$$d = \frac{100 \times X}{(H - Y)} \quad (3)$$

Onde:

X = distância entre a linha AB e o plano vertical do CGP2 do trator (m);

Y = distância entre a linha AB e a linha AC no plano do terreno(m) e,

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

Segundo os autores, o tombamento lateral ocorre em duas etapas distintas, sendo que a flexão lateral dos pneus contribui decisivamente para a instabilidade lateral do trator, podendo permitir que a bitola efetiva seja reduzida.

Liu et al. (1999) desenvolveram um sistema de mapeamento da estabilidade de tratores agrícolas e outros veículos que operam nas mesmas condições de terreno. Empregaram um sistema de medição da estabilidade do trator, um sistema para o mapeamento por vídeo, além do sistema de posicionamento global diferencial (DGPS), e de um sistema de informações geográficas (SIG). Com esse conjunto de sistemas determinaram a estabilidade de tratores agrícolas operando em condições de terreno inclinado sem a necessidade de riscos pois o controle do veículo é feito à distância, atuando em um potenciômetro que controla sua direção. Assim é eliminada a necessidade de um operador para ensaios em situações mais críticas, como o que avalia limite de estabilidade lateral. Os autores descrevem também um modelo de cálculo do índice de estabilidade, que vai de 0 a 100, e que depende das características físicas do trator e do modelo de estabilidade. O índice de estabilidade 100 indica que há uma alta estabilidade e que o trator pode ser operado com uma velocidade constante num determinado declive. Já o índice de estabilidade 0 indica que o trator está operando em condições de instabilidade. Assim, o índice de estabilidade proposto é obtido através das equações 4 e 5.

$$SI = \left(1 - \frac{U}{U_{cri}} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$SI' = SI \times U_d \quad (5)$$

Onde:

SI = índice de estabilidade estática;

U = condição variável;

U_{cri} = valor crítico, indicando perda de estabilidade do trator;

SI' = índice de estabilidade dinâmica;

U_d = fator dinâmico, dependente da energia cinética do trator.

2. 4 Aplicações de clinômetros

Doebelin (1976), descrevendo aplicações de pêndulos como sensores de deslocamento angular, cita os sistemas de controle de pavimentação de rodovias, scrapers, alinhamento de pilares, construções civis diversas e pontes. Também são empregados para controle de atitude de submarinos mísseis ou torpedos.

Heinz Jr (1978) cita uma aplicação para os clinômetros nas áreas de geologia e edificações, onde são utilizados para obter-se medidas de deformações em maciços de terra. Também em fundações que possam sofrer compressão os clinômetros indicam deformações, além de poderem determinar linhas elásticas de estacas durante provas de carga.

Spencer et al. (1983) empregaram um pêndulo conjuntamente a um potenciômetro para obtenção do ângulo de inclinação no qual o trator agrícola opera durante ensaios de desaceleração brusca do trator, o que segundo os autores corresponde à declividade na qual a perda de controle ocorre. Assim, o

conhecimento da inclinação na qual ocorre a perda de controle do trator, obtida nesses ensaios, seria a mesma na qual o trator perderia a estabilidade.

Com o objetivo de determinar o limite de estabilidade estática de tratores agrícolas, Owen & Hunter (1988) empregaram um clinômetro em um dispositivo que era conectado a uma célula de carga tipo plataforma. Os pneus traseiros eram colocados sobre essa célula de carga, estando o trator em um declive, repetindo-se o procedimento tanto para o pneu do lado de cima do declive, como o que estava no lado de baixo. Também compunha esse dispositivo, um clinômetro que acusava o ângulo em que era feita a medição. Os autores ressaltam a importância do conjunto por dispensar estruturas mais complexas, além de ser seguro, de fácil utilização e portátil.

Werneck (1996) cita diversas aplicações para clinômetros nas mais diversas áreas como em operações de terraplanagem onde esse equipamento é instalado junto à lâmina de corte da motoniveladora, de modo que a mesma trabalhe numa inclinação determinada. Também na indústria naval, onde um clinômetro determina o ângulo de adernamento de navios. Outra aplicação se dá em plataformas flutuantes de petróleo, onde é usado para monitorar o ângulo de inclinação das mesmas, permitindo que um sistema automático mantenha-as estáveis. Cita também outras aplicações na área de geologia, onde os clinômetros são utilizados para análise de variação na movimentação das camadas do solo. Finalmente em medições eletrônicas de peso onde um clinômetro é posicionado junto a uma estrutura do braço de uma balança de precisão. Desse modo com o emprego de um computador é possível obter-se a leitura precisa do peso a partir de uma mínima movimentação do braço da balança.

Homa (1996) descreve o modelo de clinômetro utilizado no painel de instrumentos de aeronaves de pequeno e médio porte e que consta de um tubo recurvado e transparente, contendo em seu interior querosene e uma esfera móvel. Com ele o piloto visualiza a inclinação lateral assumida pela aeronave, dispondo de uma importante informação para a operação correta e segura.

Rds Technology (1996) descreve a aplicação de um clinômetro, em conjunto com outros sensores e dispositivos que são alimentados por uma bateria de 12V, cujo objetivo é o de monitorar o ângulo assumido por colhedoras de grãos, quando operando em áreas com declives. O objetivo é de eliminar o efeito de leituras mascaradas no sensor de produtividade. Com a inclinação do conjunto, a leitura já não será mais exata, necessitando da informação do ângulo fornecido pelo clinômetro para sua correção. Este clinômetro funciona com um pêndulo metálico unido a um potenciômetro circular e um circuito eletrônico imersos em óleo de silicone para amortecer seus movimentos.

Balsari et al. (1997) empregaram um sensor de inclinação para o controle direcional de tratores agrícolas. Este sensor era parte integrante de um conjunto formado também por um sensor de direção, um GPS, um sensor de velocidade e um painel de controle. O objetivo era obter o alinhamento entre sucessivas passadas no campo durante operações agrícolas.

Fabricantes de veículos introduziram um clinômetro que objetiva dar informações ao condutor acerca dos limites de operação de veículos utilitários em áreas inclinadas (Mitsubishi, 1998). Tais veículos são projetados, entre outros fins, para operar em condições topográficas similares aos dos tratores agrícolas.

Pequenos declives podem provocar perdas de grãos em colhedoras. Por isso fabricantes inseriram nessas máquinas um sistema de compensação baseado em um pêndulo metálico cujo movimento acompanha a inclinação assumida pela colhedora. Assim transmite essa informação via sistema hidráulico, o que permite que a peneira superior passe a realizar um movimento alternativo com maior intensidade e em uma direção que compensa a inclinação, de forma automática. Consideram que com esse sistema a colhedora possa operar satisfatoriamente até uma declividade de 20%, sem haver comprometimento da sua eficiência (Claas, 1999).

2. 5 Instrumentos de medição

Segundo Doebelin (1976), qualquer instrumento retira alguma energia do meio que está sendo medido. Portanto, a quantidade medida será perturbada pelo próprio ato de medição, tornando assim teoricamente impossível uma medição sem ocorrência de algum erro. Os melhores instrumentos seriam aqueles que são projetados para reduzir ao máximo esse efeito, porém, em grau variado, ele sempre está presente.

Os sistemas de medição têm como objetivo básico apresentar um valor numérico referente a uma determinada variável que está sendo medida. De maneira geral, esse valor numérico ou valor medido não será exatamente igual ao valor verdadeiro da variável, (Bentley, 1992).

Beckwith et al. (1993) consideram que o processo ou mesmo a ação de medir, baseia-se na obtenção de uma comparação de quantidades de um padrão predeterminado e uma medição qualquer. Essa medição refere-se a parâmetros físicos específicos que estão sendo observados e quantificados, ou seja, a quantidade que entra para o processo de medição. Também consideram que existem basicamente dois sistemas de medição. O primeiro, de comparação direta com um padrão qualquer, e o segundo de comparação indireta através do emprego de um sistema de calibração.

Dally et al. (1993) consideram que o erro verificado em um instrumento é a diferença entre o valor verdadeiro e o valor observado da quantidade que está sendo medida, que pode ser um deslocamento, temperatura ou pressão. Também ressaltam que um bom projeto de um sistema eletrônico minimiza o erro, mas não o elimina completamente, pois o mesmo é inevitável em qualquer sistema. Ainda apontam como causas para a ocorrência de erro o acúmulo do erro aceitável em cada um dos elementos do sistema, funcionamento inadequado de um elemento qualquer do sistema, efeito do transdutor no sistema, dupla sensibilidade do transdutor e, outras fontes de perdas.

Abordando as características gerais dos instrumentos, Werneck (1996) considera que o desempenho de qualquer equipamento deva ser em relação a certas medidas características e de aceitação mundial. Dentre elas destaca a faixa ou range, resolução, sensibilidade, histerese, erro, acurácia, precisão além de algumas outras mais específicas.

Analisando os diversos processos e instrumentos para medições, Gray (1977) cita a barra de seno e a régua de seno para a medição de ângulos, com emprego de blocos padrão, de modo a obter-se o ângulo por simples triangulação. O comprimento da barra de seno é conhecido, assim como a altura do bloco padrão empregado, restando então a obtenção do ângulo desejado empregando-se a equação 6.

$$\sin \theta = \frac{H}{L} \quad (6)$$

Onde:

$\sin \theta$ = seno do ângulo que se procura (graus);

H = altura do bloco padrão (mm) e,

L = comprimento da barra ou régua de seno (mm).

Metrologia (1997), citando as possibilidades de se fazer medição de ângulos de peças na indústria de forma a obter-se maior exatidão, caracteriza a mesa de seno e a régua de seno para esse fim. A régua de seno constitui-se em uma barra de aço tratado por processos de têmpera e retificação, apresentando formato retangular. Uma das extremidades é dotada de um rebaixo que serve de fixação, o outro rebaixo é próximo à outra extremidade. Esses rebaixos servem para colocação de dois cilindros que apóiam a régua. Para ser empregada, deve-se utilizar, conjuntamente, os blocos padrão, que apresentam erro máximo de $\pm 8,00\mu\text{m}$, a 20°C . São colocados numa das extremidades da régua de seno, e por simples triangulação, conhece-se o ângulo de inclinação, pois o comprimento da régua assume o valor da

hipotenusa. O cateto oposto é representado pelo bloco padrão, de modo que se chega facilmente ao ângulo α desejado. Raciocínio idêntico vale para a mesa de seno, que difere da régua de seno, basicamente em relação às proporções, que no seu caso são maiores, além de apresentar uma base que facilita sua inclinação. A mesa de seno é mostrada com detalhes na Figura 2, onde percebe-se o posicionamento do bloco padrão e a forma como obtêm-se o ângulo desejado.

Figura 2 - Representação esquemática de uma mesa de seno com um bloco padrão de 50 mm (Metrologia, 1997).

Com base na questão levantada acerca dos tombamentos laterais de tratores agrícolas, é proposta nesse trabalho uma alternativa para a prevenção desses acidentes. Tal proposta se baseia na calibração ou caracterização do desempenho de um modelo de clinômetro disponível no Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP. Uma vez considerado satisfatório nessa caracterização, esse clinômetro poderia ser empregado para monitorar o ângulo de inclinação do terreno no qual o trator agrícola opera. O conhecimento desse ângulo de inclinação em tempo real é uma informação útil para o operador que pode assim prevenir esse tipo de acidente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Para a realização desse trabalho foi empregado um clinômetro marca RDS, modelo “Satloc Yield Monitor Hillside Angle Sensor”, de pêndulo metálico imerso em 100 ml de óleo de silicone, embutido em uma caixa metálica. Este equipamento é alimentado por uma bateria elétrica de 12V e sua faixa de leitura é de 0° a 25°.

A Figura 3 mostra o interior desse clinômetro, cuja tampa superior foi removida. Observa-se o pêndulo metálico, os circuitos eletrônicos e o cabo elétrico do sinal de saída. Na parte superior pode-se perceber que o pêndulo metálico está fixado em um eixo horizontal de rotação que o une a um potenciômetro circular.

O funcionamento desse sensor se baseia na variação da tensão elétrica do potenciômetro circular em qualquer posição assumida pelo pêndulo. Dessa forma qualquer movimento imposto ao pêndulo resultará na variação da resistência elétrica do potenciômetro, fornecendo um valor da tensão elétrica correspondente e que constitui-se no sinal de saída do equipamento.

Figura 3 - Vista interna do clinômetro observando-se o pêndulo metálico (a), circuito eletrônico (b), cabo de saída do sinal (c) e eixo de rotação e potenciômetro (d).

Esse sensor compõe um conjunto comercial de instrumentos que é empregado em colhedoras automotrizes, para o monitoramento da colheita de grãos. Fazem também parte do sistema, os sensores de fluxo de grãos, sensor de velocidade da máquina e também um sensor de umidade dos grãos. Esse conjunto de sensores trabalha conectado a um painel de controle que faz a conversão do sinal de saída do clinômetro, em volts (V), para uma leitura de ângulo lida diretamente no seu visor.

Para a calibração estática do clinômetro empregou-se ainda uma bateria marca Yuasa, 12V, 1,2Ah, ácida, de chumbo, além de um paquímetro digital marca Mitutoyo com curso total de 150mm. Também empregou-se uma mesa de seno marca Mitutoyo juntamente com blocos padrão classe 0, marca Brown e Sharpe com 47 blocos, além de um multímetro digital marca Mitutoyo.

Em seguida foi feito o levantamento topográfico da área de ensaio, empregando um nível ótico e régua topográfica marca Wild, e uma trena com extensão de 20m, marca Starret. Para sua representação gráfica utilizou-se o programa computacional "Surfer" (Golden Software Inc.).

Para a calibração dinâmica empregou-se o clinômetro instalado no trator marca Massey Ferguson modelo 5285, 4X2, sem cabine, com um arco metálico como estrutura de proteção contra capotagem. Completando a instrumentação do trator para ensaio dinâmico, foi empregado um coletor de dados marca Campbell Scientific modelo CR10X. Ainda foram utilizados outros materiais como pipeta de vidro com capacidade para 100ml e acessórios diversos como cabos, chave liga-desliga e conectores elétricos.

3.2 Métodos

3.2.1 Metodologia para o ensaio do clinômetro sob condições estáticas

Inicialmente procedeu-se à avaliação do clinômetro sob condições estáticas, empregando-se uma mesa de seno e obtendo-se então suas características estáticas. Empregou-se a mesa de seno devido às suas características de funcionamento, uma vez que utiliza blocos padrão de grande acurácia, que têm largo emprego na metrologia industrial e também devido a sua praticidade para medição de ângulos. Essa calibração foi conduzida em ambiente climatizado, com temperatura constante de 20°C, conforme recomendação técnica para emprego dos blocos padrão (Metrologia, 1997).

Foram obtidas a curva de calibração, a sensibilidade estática, precisão, erro sistemático, histerese, e a faixa de leitura do instrumento. A curva de calibração e a histerese são obtidas da representação gráfica das leituras de entrada e de saída. A sensibilidade estática é lida diretamente na equação da reta. A histerese indica uma condição de não coincidência entre as curvas de

carregamento e descarregamento do instrumento. A precisão corresponde ao erro ao acaso. A faixa de leitura do instrumento, fornecida pelo painel de controle, foi obtida pela inclinação máxima à direita e também à esquerda na mesa de seno.

Na execução dessa calibração o clinômetro foi fixado na mesa de seno, de modo a se tomar leituras sucessivas a intervalos constantes de 2° , a partir de 0° até 22° , mais os valores ímpares 1° , 11° e 21° . O processo consistiu em realizar-se a leitura do ângulo assumido pela mesa de seno e o valor fornecido pelo clinômetro, exibido no visor do multímetro a ele conectado e fornecido em V. Assim, obteve-se valores de ângulos lidos como entrada (input) e para os valores de saída (output) as leituras foram dadas em V, que posteriormente, foram convertidas em graus através da equação da reta respectiva, esquerda ou direita. Dessa forma utilizou-se a equação com o valor do sinal em V, obtendo-se então o valor correspondente em graus.

Todas as medidas e números dos blocos padrão, pertencentes à classe 0, empregados em cada ponto amostrado na calibração, são mostrados na Tabela 1. Cada medida apresenta um valor do ângulo de inclinação da mesa de seno correspondente. Para o modelo de mesa de seno empregado, o valor do ângulo igual a zero (0°) é obtido com a colocação de blocos padrão de modo a se obter a medida de 12,5mm.

Obteve-se também o tempo de resposta do clinômetro, fixando-o a uma estrutura e registrando no coletor de dados os sinais das variações de inclinação que lhe foram impostas, movimentando-se lateralmente essa estrutura à qual foi fixado. Obteve-se assim valores da variação do sinal do clinômetro em relação ao tempo.

Tabela 1. Medidas e número de blocos padrão empregados na calibração estática do clinômetro onde cada medida corresponde a um ângulo de inclinação da mesa de seno.

Medida (mm)	Número empregado	Medida de cada bloco empregado (mm)			
12,50	2	11	1,5		
21,22	3	19	1,2	1,02	
29,94	4	25	2	1,9	1,04
38,63	4	25	11	1,6	1,03
47,29	4	25	20	1,2	1,09
55,91	4	50	3	1,9	1,01
64,48	4	50	12	1,4	1,08
72,98	4	50	20	1,9	1,08
81,41	4	75	4	1,4	1,01
89,75	4	75	12	1,7	1,05
98,00	2	75	23		
106,15	4	100	4	1,1	1,05

Para a obtenção do erro sistemático e do erro ao acaso, tanto para a inclinação do clinômetro à esquerda como à direita adotou-se o critério apresentado na equação 7, conforme Doebelin (1976).

$$\text{Erro sistemático} = \text{Leitura obtida} - \text{Valor real} \quad (7)$$

A estimativa do valor do sinal de entrada ($\overline{q_i}$), por sua vez, é obtida da equação da reta (8).

$$\overline{q_i} = \frac{\overline{q_o} + b}{a} \quad (8)$$

Onde:

$\overline{q_i}$ = estimativa do valor do sinal de entrada;

a = sensibilidade estática da reta;

$\overline{q_o}$ = estimativa do valor do sinal de saída e,

b = intercessão dos eixos x e y.

Já o erro ao acaso ou imprecisão, conforme Doebelin (1976), foi estabelecido como $\pm 3 s_{q_i}$ (desvio padrão). Por sua vez o s_{q_i} , que é o desvio padrão das leituras de entrada, é dado pela equação 9.

$$s_{q_i}^2 = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{q_o - b}{m} - q_i \right)^2 \quad (9)$$

Onde:

s_{q_i} = desvio padrão do sinal de entrada;

m = sensibilidade estática da reta;

N = número de leituras realizadas;

q_i = sinal de entrada e,

q_o = sinal de saída.

3.2.2 Ensaios de campo

Para os ensaios dinâmicos de campo utilizou-se uma área do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, em Piracicaba, SP, em três taludes distintos, denominados em ordem decrescente de inclinação de “talude 1”, “talude 2” e “talude 3”, todos apresentando a superfície coberta de grama. Esses três taludes foram empregados por apresentarem declividades que não excederam a faixa de leitura do clinômetro, além de não exporem o operador a

um risco maior durante os ensaios. O talude 1 apresentou um ângulo de inclinação médio de 17° com amplitude de 13° a 20° . O talude 2 apresentou ângulo de inclinação médio de 9° e amplitude de 6° a 12° . O talude 3 apresentou ângulo de inclinação médio de 6° e amplitude de 3° a 8° .

Pode-se observar nas Figuras 4, 5 e 6 os detalhes dos taludes 1, 2 e 3, respectivamente, mostrando a cobertura de grama e o trator percorrendo a faixa durante o ensaio de campo.

Figura 4 - Talude 1 e o tráfego do trator com inclinação à direita durante o ensaio dinâmico.

O trator, na sua configuração normal de trabalho apresentava lastro dianteiro de 224kgf, lastro nas rodas traseiras de 80kgf, além de conter água em três quartos do volume dos pneus traseiros. Apresentava bitola comum de serviço de 1.560mm, pressão de inflação dos pneus dianteiros e traseiros 0,13 mPa (18 psi). Tanque de combustível com 50% da capacidade, radiador, cárter e caixa-de-câmbio completos e o operador de 62kgf. Assim, sua massa total em ordem de marcha no início do ensaio, era de 4.500kgf.

Figura 5 - Talude 2 durante uma das passadas do trator no ensaio de campo.

O trator foi operado nesses ensaios na 3ª marcha, de escalonamento 2-B-Reduzida, o que lhe conferiu uma velocidade de aproximadamente $0,56\text{m.s}^{-1}$ a uma rotação do motor de 1.200rpm.

Determinou-se, inicialmente, em cada um dos três taludes, o rastro dos pneus traseiros do trator. Para tanto utilizou-se seis passadas contínuas, deixando-se um rastro bem definido na superfície de grama, marcado a seguir com cal. Essa prática visou uniformizar o ponto de contato pneu-solo, evitando que no momento do ensaio houvesse modificações na superfície do solo. Também facilitou ao operador a visualização da linha a ser seguida em cada talude por ocasião dos ensaios.

Figura 6 - Trator durante uma passada no talude 3, observando-se na parte inferior direita a rampa marcadora utilizada para produzir um pico de sinal.

Delimitou-se 20m de comprimento nas linhas marcadas com cal. Essas mesmas linhas foram demarcadas com piquetes de madeira a intervalos de um metro. Com o auxílio de um nível ótico, em cada piquete registrou-se duas leituras paralelas na régua topográfica, uma em cada uma das linhas demarcadas pelos pneus traseiros do trator. Obteve-se portanto, 21 pontos transversais, desde o marco zero, com duas leituras em cada um. Pôde-se então obter a diferença de nível, a declividade e o ângulo de inclinação em cada ponto transversal. Essas cotas foram obtidas com o objetivo de serem empregadas como referência e assim confrontar-se com os registros feitos pelo clinômetro e registrados no coletor de dados a ele conectado.

O trator percorreu 10m antes do início de cada passada, de modo a estabilizar as oscilações a que era submetido. O trator fez o percurso equipado com o clinômetro e com o coletor de dados. A variação das irregularidades do terreno era registrada em volts a intervalos de 0,5s.

O clinômetro foi fixado próximo à barra de tração do trator, de modo que o eixo de apoio do pêndulo se posicionasse no plano vertical longitudinal do trator e na posição mais baixa possível, conforme recomendação do fabricante. O acionamento do coletor de dados deu-se através de um interruptor fixado na alavanca de comando do sistema de levante hidráulico. Nesse modelo de trator, esta alavanca é posicionada próximo ao apoio do braço do operador, o que permitiu seu fácil acionamento. O acionamento era feito no momento que o pneu dianteiro do trator transpunha uma rampa de madeira de 0,15m de altura (Figura 6), posicionada a 1m antes da linha inicial de cada faixa do percurso e a 1m após a linha final dessa faixa. O objetivo era o de produzir uma perturbação no trator de modo a gerar um sinal extremo nos registros feitos pelo coletor de dados. Como o mesmo trabalhava com leitura contínua após o acionamento, com esse sinal diferenciado, tornou-se mais claro identificar o início e o final de cada passada.

Adotou-se o critério de eliminar leituras a partir dos picos descritos no início e no final da linha de tiro. Essa eliminação foi feita com base na velocidade do trator e no intervalo de registro do coletor de dados que foi de uma leitura a cada 0,5s. Obteve-se assim, o ângulo de inclinação do terreno lido pelo clinômetro, ao longo de cada talude e na inclinação à direita e à esquerda em cada um, de modo a permitir confrontar os resultados entre a leitura com o instrumento e com o nível ótico.

Não empregou-se nenhum implemento nesses ensaios, já que o objetivo era o de verificar o comportamento do instrumento no trator, independente da operação a que estivesse submetido.

3.3 Delineamento estatístico empregado

Para comparar o método proposto com o método referência, foram instalados seis experimentos no delineamento blocos casualizados, com dois

tratamentos e 21 blocos cada. Os tratamentos foram representados pelos métodos de medição (método proposto e o método referência) enquanto que os blocos foram representados por pontos distintos de medição. Os seis experimentos foram obtidos a partir do seguinte esquema: três taludes diferentes e em duas direções distintas, esquerda e direita, em cada um deles. Os métodos de medição foram comparados pelo teste F, a 5% de probabilidade.

Foi feito ainda, para cada experimento, uma análise de correlação de Pearson, com intuito de verificar semelhanças entre os dois métodos de medição. Por se tratar de apenas dois tratamentos foi feita a análise de variância ao invés do teste t.

Os experimentos foram analisados como blocos casualizados e cada medida foi feita em um ponto diferente. Para que medições sejam consideradas repetições, espera-se que as respostas sejam as mais próximas possíveis. Como no caso deste experimento, esperava-se que as medidas feitas nos diversos pontos fossem diferentes, os pontos foram denominados de blocos e não de repetições.

Na sequência foi feita uma análise de correlação com os dados obtidos, confrontando os valores de ângulos lidos pelo clinômetro e aqueles calculados a partir das leituras do nível ótico topográfico. Medidas de correlação medem associação entre variáveis, podendo o coeficiente de correlação variar entre -1 e +1. Caso os métodos fossem exatamente iguais, o coeficiente de correlação deveria ser igual a +1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio do clinômetro sob condições estáticas

A Figura 7 mostra o comportamento dos pontos amostrados na calibração do clinômetro com inclinação à esquerda, onde se observa a ocorrência de linearidade entre os pontos amostrados, com pequeno valor do erro sistemático do instrumento nessa condição e valor de R^2 próximo a 1. Também é possível se verificar que, como a curva de calibração está inclinada para baixo, a sensibilidade estática terá sinal negativo.

Com base na equação da reta de calibração do clinômetro, obteve-se as características estáticas para a inclinação à esquerda com o erro sistemático de $-0,4V/^\circ$ e o erro ao acaso ou imprecisão de aproximadamente $\pm 1,08V/^\circ$. A sensibilidade estática foi de $-0,0692V/^\circ$. Na faixa de leitura do clinômetro, compreendida de 0° a 25° , não verificou-se histerese no instrumento.

A Figura 8 apresenta a curva de calibração com os pontos amostrados na calibração com inclinação do clinômetro à direita.

Figura 7 - Curva de calibração do clinômetro com inclinação à esquerda.

Figura 8 - Curva de calibração do clinômetro com inclinação à direita.

Observa-se, tal como ocorreu na inclinação à esquerda, que houve grande proximidade entre os valores lidos e a leitura real, o que também é demonstrado pelo valor de R^2 bem próximo a 1. Como a reta está inclinada para cima, a sensibilidade estática tem sinal positivo.

De modo análogo à inclinação à esquerda, também para a inclinação do clinômetro à direita, obteve-se as características estáticas cujo erro sistemático foi de $-0,1000V/^\circ$. O erro ao acaso ou imprecisão foi de $\pm 1,4100V/^\circ$ e a sensibilidade estática igual a $0,0701V/^\circ$. Na faixa de leitura de 0° a 25° também não verificou-se histerese.

O tempo de resposta do instrumento obtido com emprego do coletor de dados foi de 0,65s, portanto, abaixo de 0,7s que é o tempo no qual se inicia um acidente, conforme Balastreire (1979). Considera-se, portanto, que o desempenho do clinômetro em condições estáticas foi excelente, habilitando-o para análise em condições dinâmicas.

4.2 Ensaios de campo

Para a análise dinâmica, foram considerados seis experimentos distintos, obtidos a partir dos três taludes e nas inclinações à direita e à esquerda para cada um. Esses taludes foram empregados por não apresentarem declividade muito acentuada pois, segundo Palacio (1975), o limite de declividade para operação segura com trator agrícola deve ser de 30% a 35%.

Nas Figuras 9, 10 e 11 observa-se o perfil dos taludes 1, 2 e 3, respectivamente, obtidos com levantamento topográfico. As linhas longitudinais horizontais correspondem, em todas as figuras, ao ponto de contato do pneu com o solo, sendo o espaçamento entre elas correspondente à bitola do trator.

Figura 9 - Perfil do talude 1 obtido do levantamento topográfico com o nível óptico; as linhas longitudinais correspondem ao ponto de contato dos dois pneus traseiros com o solo.

Figura 10 - Perfil do talude 2 obtido do levantamento topográfico com o nível óptico; as linhas longitudinais correspondem ao ponto de contato dos dois pneus traseiros com o solo.

Figura 11 - Perfil do talude 3 obtido do levantamento topográfico com o nível óptico; as linhas longitudinais correspondem ao ponto de contato dos dois pneus traseiros com o solo.

Os três taludes empregados no ensaio dinâmico apresentavam variação do perfil ao longo da faixa de 20m de tráfego. No talude 3 essa variação foi mais intensa, além de ter apresentado também a maior sinuosidade da superfície, embora sua declividade não fosse a mais acentuada.

As Figuras 12, 13 e 14 mostram o comportamento do clinômetro nas inclinações à direita e à esquerda em relação à referência. No talude 1, tanto as leituras com inclinação à direita como à esquerda, mantiveram-se acima das observadas na referência. No talude 2 ainda permanece essa tendência das leituras situarem-se acima da referência apenas com predominância menor que no talude 1. Já no talude 3 os valores lidos pelo clinômetro se confundiram mais com os valores de inclinação da referência, notadamente na inclinação à esquerda. Como trata-se das mesmas condições de inclinação e de instrumentação, as diferenças observadas refletem a limitação do clinômetro em termos de acurácia, mas também incorporam prováveis erros experimentais. Um desses erros diz respeito à reprodução do percurso sobre a linha dos piquetes por parte do operador.

Figura 12 - Leituras do ângulo de inclinação do talude 1 à direita e à esquerda em relação à referência.

Figura 13 - Leituras do ângulo de inclinação do talude 2 à direita e à esquerda em relação à referência.

Figura 14 - Leituras do ângulo de inclinação do talude 3 à direita e à esquerda em relação à referência.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros estatísticos descritivos para as diferenças, em porcentagem, entre as leituras fornecidas pelo clinômetro e o levantamento topográfico, nos seis tratamentos do ensaio dinâmico. Nos anexos (Tabela 5) são apresentados os dados originais das diferenças entre leituras. Todos os parâmetros fornecidos com sinal negativo indicam que o tratamento apresentou leituras predominantes acima do valor da referência. Percebe-se, que nos taludes 1 e 2, as leituras do clinômetro mantiveram-se, predominantemente, acima das leituras fornecidas pelo levantamento topográfico.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos descritivos para as diferenças entre os tratamentos e a referência.

Parâmetro	Talude					
	1		2		3	
	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda
Erro Médio(%)	-20,11	-22,72	-14,74	-14,04	4,48	9,74
Máxima(%)	-1,18	2,97	6,15	3,75	80,42	71,40
Mínima(%)	-48,38	-50,64	-47,62	-64,64	-15,23	-30,55
Mediana(%)	-22,17	-22,01	-13,23	-6,85	-1,57	6,04
Desvio Padrão(%)	12,05	11,95	11,67	17,24	20,94	27,98
Coefficiente de Variação	-0,60	-0,53	-0,79	-1,23	4,67	2,87
Quartil Superior(%)	-10,30	-15,90	-9,46	0,13	7,61	25,26
Quartil Inferior(%)	-26,33	-29,67	-14,82	-26,02	-6,29	-8,79

A Tabela 3 apresenta a síntese da análise de variância para cada tratamento com os valores do coeficiente de variação, teste T, correlação de Pearson e significância para os valores das leituras, em graus, fornecidas pelo clinômetro em relação ao levantamento topográfico adotado como referência.

Tabela 3. Síntese da análise da variância para os valores do coeficiente de variação, teste T, correlação e significância para as comparações entre ângulos da referência e aqueles dos diferentes tratamentos.

Tratamentos	C.V. (%)	Correlação	T	Significâncias (%)
Talude 1 - esquerda	6,52	0,3613	1,6892	0,0538
Talude 1 - direita	6,39	0,4088	1,9523	0,0329
Talude 2 - esquerda	11,47	0,6196	3,4408	0,0014
Talude 2 - direita	6,53	0,8386	6,7105	0,0000
Talude 3 - esquerda	12,12	0,4262	2,0538	0,0270
Talude 3 - direita	10,38	0,6236	3,4767	0,0130

Conforme é mostrado na Tabela 3, no primeiro tratamento, talude 1 com inclinação à esquerda, o clinômetro não apresentou semelhança estatisticamente significativa ao nível de 5% com a referência. Já, para a inclinação à direita, nesse talude, o clinômetro apresentou semelhança estatisticamente significativa com a referência. Na Tabela 2 observa-se que na inclinação à direita, que apresentou erro médio aproximado de 20% para maior (Tabela 5, anexos), o clinômetro se mostrou mais preciso do que na inclinação à esquerda que apresentou um erro médio aproximado de 23%. Tanto na inclinação à direita quanto à esquerda, o clinômetro apresentou no talude 1, as curvas similares à da referência, acompanhando suas tendências de elevação e

de depressão e posicionando-se com valores das leituras acima da referência, o que é mostrado na Figura 12.

Para o talude 2, nas inclinações à direita e à esquerda, o clinômetro apresentou semelhança estatisticamente significativa com a referência. Nesse talude observou-se inclusive semelhança significativa ao nível de 1% na inclinação à direita. Esse talude apresentou um erro médio de 15% (Tabela 5, anexos) para maior tanto para a inclinação à direita quanto para a inclinação à esquerda. De modo geral, observa-se que foi nesse talude que o clinômetro apresentou o comportamento mais satisfatório tanto por registrar erros em níveis inferiores aos demais taludes como por ter acompanhado as tendências de elevação e de queda nos valores das leituras ao longo do talude. Um dos fatores responsáveis por erros nas leituras fornecidas pelo clinômetro nesse talude 2 parece ser o tempo de resposta do equipamento, que fica evidente na leitura próxima ao ponto 14 (Figura 13) das abscissas na inclinação à direita, na qual a tendência de elevação do valor da leitura do clinômetro acompanha a referência, porém manifestando-se posteriormente a ela.

No talude 3, o clinômetro apresentou semelhança estatisticamente significativa com a referência, tanto na inclinação à direita quanto na inclinação à esquerda. Na Figura 14 observa-se que as leituras do clinômetro com inclinação à direita mantiveram-se mais próximas da referência, tendo apresentando um erro médio de cerca de 12% (Tabela 5, anexos). Porém, na inclinação à esquerda, o clinômetro mostrou-se menos preciso, sem acompanhar, com predominância, as tendências de elevação e de decréscimo observadas na referência, com um erro médio aproximado de 22%, mostrado na Tabela 2. A disparidade entre a curva da inclinação à esquerda em relação à referência foi a maior entre todos os tratamentos, pois foi a que mostrou-se com leituras mais distantes da referência ao longo da faixa de tráfego, sugerindo que esse desempenho insatisfatório se deva à associação de diversas fontes de erro.

A análise dos três taludes sugere que a inércia do pêndulo do clinômetro manifestou-se de forma intensa de modo que nos taludes 1 e 2, onde as inclinações foram maiores, as leituras de modo geral também assumiram valores acima da referência. Já no talude 3, de inclinação mais suave, o pêndulo tendeu a posicionar-se mais ao centro, resultando em cerca de 50% das leituras fornecidas pelo clinômetro posicionadas abaixo da referência.

Pode também ser considerado como efeito da inércia do pêndulo o fato de que nos três taludes analisados, as leituras do primeiro ponto da faixa de leitura estavam acima da referência, o que pode ser explicado pela ação da rampa de madeira de 0,15m de altura empregada para produzir um sinal extremo para melhor identificação do início da faixa de leitura. Apesar dessa rampa estar situada a 1m do início da faixa de leitura, possivelmente a associação entre a inércia do pêndulo e o tempo de resposta do clinômetro, que era de 0,65s, influenciou as primeiras leituras fornecidas pelo clinômetro nos três taludes analisados.

Analisando-se o desempenho do equipamento, verifica-se que nenhuma fonte de erro parece ser responsável sozinha pela não coincidência entre as leituras fornecidas pelo clinômetro e a referência, apesar dos erros de leitura do clinômetro serem semelhantes nos seis tratamentos. Deve-se considerar que ao longo da faixa de tráfego a superfície era irregular, provocando oscilações bruscas no trator, transmitidas ao pêndulo do clinômetro que, associadas ao tempo de resposta do equipamento, contribuíram para os erros de leitura e também confirmando que esse ensaio aproximou-se das condições reais de emprego prático de tratores agrícolas.

Assim, esse modelo de clinômetro apresenta-se como opção para operação segura de tratores agrícolas em taludes por fornecer instantaneamente o ângulo no qual o trator está submetido. Conforme Spencer & Gilfillan (1976) os modelos matemáticos de predição constituem-se no recurso básico empregado atualmente para a prevenção de tombamento lateral de tratores agrícolas e são falhos principalmente para condições dinâmicas.

Para Dias et al. (1993b) a grande limitação desses modelos é que não consideram, por exemplo, a rugosidade da superfície do solo ou a flexão lateral dos pneus. Um exemplo dessa limitação ocorre no modelo proposto por Mialhe (1980), no qual o autor propôs descrever um modelo matemático de predição do tombamento lateral de tratores considerando que se adote apenas 50% do valor obtido devido ao maior risco envolvido em condições dinâmicas, já que o modelo é proposto apenas para condições estáticas. Essa margem de segurança não tem sua origem justificada, denotando ser um valor arbitrado sem uma referência teórica para tal, podendo inclusive estar subestimado. Considerando a limitação desses modelos matemáticos de predição do ângulo limite de inclinação para tratores agrícolas, pode-se considerar o modelo de clinômetro analisado como uma opção mais confiável e próxima de uma aplicação prática efetiva.

5 CONCLUSÕES

De acordo com as observações do trabalho pode-se concluir que:

- o clinômetro instalado em um trator reproduziu os taludes em que o veículo transitou com o grau de significância estabelecido de 5% em cinco dos seis tratamentos do ensaio dinâmico a que foi submetido;
- o equipamento demonstrou melhor desempenho nos taludes 1 e 2 que apresentaram maior ângulo de inclinação, entre 5° e 20°, sendo que as leituras mantiveram-se acima da referência.

ANEXOS

Dimensão (mm)	Exatidão a 20° C (μm)			
	Classe			
	00	0	1	2
Até 10	± 0.06	± 0.12	± 0.20	± 0.45
10 – 25	± 0.07	± 0.14	± 0.30	± 0.60
25 – 50	± 0.10	± 0.20	± 0.40	± 0.80
50 – 75	± 0.12	± 0.25	± 0.50	± 1.00
75 – 100	± 0.14	± 0.30	± 0.60	± 1.20
100 – 150	± 0.20	± 0.40	± 0.80	± 1.60
150 – 200	± 0.25	± 0.50	± 1.00	± 2.00
200 – 250	± 0.30	± 0.60	± 1.20	± 2.40
250 – 300	± 0.35	± 0.70	± 1.40	± 2.80
300 – 400	± 0.45	± 0.90	± 1.80	± 3.60
400 – 500	± 0.50	± 1.10	± 2.20	± 4.40
500 – 600	± 0.60	± 1.30	± 2.60	± 5.00
600 – 700	± 0.70	± 1.50	± 3.00	± 6.00
700 – 800	± 0.80	± 1.70	± 3.40	± 6.50
800 – 900	± 0.90	± 1.90	± 3.80	± 7.50
900 - 1000	± 1.00	± 2.00	± 4.20	± 8.00

Fonte: Metrologia (1997).

Quadro 2 - Erros permissíveis para blocos padrão em relação à sua classe e dimensão.

Tabela 4. Síntese da análise da variância dos seis cenários obtidos no ensaio de campo.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio					
		Talude					
		1		2		3	
		Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda
Bloco	20	3,07	3,42	4,13 ^{**}	4,5	1,48	1,21
Tratamento	1	111,7	144,86	15,24 ^{**}	13,94	0,16	1,04
Resíduo	20	1,48	1,46	0,37	1,13	0,37	0,52

Tabela 5. Erro entre a leitura do clinômetro e o levantamento topográfico para os taludes 1, 2 e 3.

Ponto	Erro(%)					
	Talude					
	1		2		3	
	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda
1	17	12	14	20	29	25
2	2	17	10	39	16	6
3	1	3	15	34	3	9
4	10	9	33	65	5	5
5	23	32	13	4	8	23
6	11	17	12	2	5	30
7	24	42	27	5	3	10
8	6	30	7	0	2	10
9	6	13	1	7	10	31
10	10	12	11	13	11	6
11	22	31	14	26	15	18
12	17	19	3	26	12	1
13	29	26	6	1	2	11
14	20	22	23	0	12	18
15	30	27	14	0	6	35
16	32	26	9	3	2	38
17	26	20	9	9	9	0
18	26	23	11	7	0	19
19	48	51	13	3	80	71
20	37	36	27	20	25	65
21	22	16	48	26	0	35
Média	20	23	15	15	12	22

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHERIN, R. A. ; MURPHY, D. J. ; WESTABY, J D. **Reducing farm injuries: issues and methods.** St. Joseph: ASAE, 1992. 58p.

ATARES, P. V. A. ; BLANCA, A. L. **Tractores y motores agrícolas.** Madrid: Mundi-Prensa, 1989. 429p.

BALASTREIRE, L. A. A prevenção de acidentes com tratores agrícolas. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v.7, n.28, p 62-65, 1979.

BALSARI, P.; TAMAGNONE, M.; BERTOLA, A. **Directional control of agricultural vehicles.** Grugliasco: BIOS Scientific, 1997. 685p.

BARGER, E.L.; LILJEDAHN, J.B.; CARLETON, W.M.; MCKIBBEN, E.G. **Tractors and their power units.** New York: John Wiley, 1963. 524p.

BECKWITH, T. G.; MARANGONI, R. D.; LINEHARD, J. H. **Mechanical measurements.** Reading: Addison-Wesley, 1993. 876p.

BENTLEY, J. P. **Principles of measurement systems.** New York: Longman Scientific Technical, 1992. 503p.

BUFFOLO, G; SILVA, P. S. Desenvolvimento de sistema para ensaios de cabines e arcos de segurança para tratores e máquinas agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Sorocaba, 1988. **Anais**. Sorocaba: SBEA, 1988. p.494-499.

CHISHOLM, C. J. Experimental validation of a tractor overturning simulation. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.24, p.395-415, 1979.

CICCO, F. M. G. A. F. Custo de acidentes. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v.12, n.45, p.55-67, 1984.

CLAAS. **Catálogo do produto**. São Paulo: Claas, 1999. 15p.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; McCONNELL, K. G. **Instrumentation for engineering measurements**. Singapore: John Wiley, 1993. 584p.

DAVIS, D. C.; REHKUGLER, G. E. Agricultural wheel-tractor overturns- Part II: Mathematical model verification by scale-model study. **Transactions of the ASAE**, v.17, n.3, p.484-492, 1974.

DIAS, G. P; ESCOBEDO, J. F; DANTAS, A. A. A. Simulação da estabilidade lateral de tratores agrícolas de pneus. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Santa Maria, 1992. **Anais**. Santa Maria: SBEA, 1992. p.1821-1833.

DIAS, G. P.; LIMA, J. S. ; FREITAS, M. C. Constantes elásticas de pneus de tratores agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Ilhéus, 1993. **Anais**. Ilhéus: SBEA, 1993a. p.1847-1853.

DIAS, G. P.; LIMA, J. S.; ESCOBEDO, J. F.; FREITAS, M. C. Estabilidade lateral de tratores agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Ilhéus, 1993. **Anais**. Ilhéus: SBEA, 1993b. p.1838-1846.

DOEBELIN, O. E. **Measurement systems: application and design**. Kogakusha: McGraw-Hill, 1976. 772p.

DUNCAN, J. R.; WILKINSON, R. H.; PURSCHWITZ, M. A.; MURPHY, D. J.; ANDERSON, K. C. **Agricultural safety and health for engineers**. St Joseph: ASAE, 1994. 93p.

FREEMAN, S. A. **Potential impact of a ROPS retrofit policy in central Iowa**. St. Joseph: ASAE, 1999. 10p. (ASAE. Paper, 99-7040).

FUNDACENTRO. **Manual de segurança, higiene e medicina do trabalho rural**. São Paulo, 1978. 185p.

GIL, E. **Utilización segura de la maquinaria agrícola**. Barcelona: Vida Rural, 1998. 92p.

GOERING, C. E. **Engine tractor power**. St Joseph: ASAE, 1992. 539p. (textbook, 3).

GRAY, B. F. **Measurements instrumentation and data transmission**. New York: Longman, 1977. 169p.

HEINZ Jr, H. K. **Inclinômetros**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1978. 32p.

HOMA, J. M. **Aeronaves e motores.** São Paulo: Editora Asa, 1996. 85p.

HUNT, D. R. **Farm power and machinery management.** Ames: The Iowa State University Press, 1973. 365p.

HUNTER, A. A review of research into machine stability on slopes. **Agricultural Engineer**, v.30, n.47, p.49-53, 1992.

HUNTER, A. G. M. Stability analysis of trailed tankers on slopes. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.32, n.4, p.311-320, 1985.

HUNTER, A. G. M. Centre of gravity analysis of fluid in inclined tanks. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.33, n.2, p.111-126, 1986.

ILLINOIS FARM RELATED DEATHS. **Farm related deaths.** WWW.age.uiuc.edu/agsafety/illin.htm. (12 ago. 1999).

INOUE, G. H. Estudo das forças nos pneus de tratores agrícolas visando avaliar a estabilidade lateral. Viçosa, 1997. 61p. Dissertação (M.S.) - Universidade Federal de Viçosa.

KHACHATRYAN, Kh. A. **Operation of soil-working implements in hilly regions.** New Delhi: Rajkamal Electric Press, 1985. 231p.

KONRAD, S. G. ; Cabinas: ainda uma opção no Brasil. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v.6, n.30, p.60-62, 1980.

LIU, J.; AYERS, P. D.; VANCE, M. **Off-road vehicle stability mapping integrating GPS/GIS and video technology.** Toronto: ASAE, 1999. 15p. (ASAE. Paper, 91-6355).

MARQUEZ, L. **Ergonomia e segurança no projeto e utilização das máquinas agrícolas.** Viçosa: UFV, 1995. 206p.

MENDES, R. **Patologia do trabalho.** Rio de Janeiro: Editora Atheneu, 1995. 643p.

METROLOGIA.: mecânica. Rio De Janeiro: Telecurso 2000, Globo, 1997. 240p.

MEZOMO, J. C. **Segurança e higiene do trabalho.** São Paulo: Cesc, 1985. 140p.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios e certificação.** Piracicaba: FEALQ, 1996. 722p.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura.** São Paulo: EPU-EDUSP, 1980. 367p.

MITSUBISHI. **Manual de instrução do proprietário.** São Paulo, 1998. 53p.

OWEN, G. M. Two types of tractor four-wheel drive engage alarm for use on slopes. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.33, n.2, p.155-158, 1986.

OWEN, G. M.; HUNTER, G. M. A microprocessor-based vehicle static stability limit calculator for field use. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.3, n.2, p.233-236, 1988.

PACCOLA, H. Ângulo de elevação das barras inferiores do sistema de engate de três pontos e a estabilidade estática longitudinal de um trator com implemento em posição de transporte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Lavras, 1996. **Anais.** Lavras: SBEA, 1996. p. 7-27.

PALACIO, V. R. **Equipos movimiento tierras, labranza-cultivacion.** Madrid: Dilagro, 1975. 250p.

PALMER, C. **Ergonomia.** Trad. de A. S. Mendonça. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1976. 208p.

PHIPPS, L. J.; MC COLLY, H. F.; SCRANTOU, L. L.; COOK, G. C. **Farm mechanics text and handbook.** Danville: The interstate, 1959. 814p.

PROMERSBERGER, W. J.; BISHOP, F. E.; PRIEBE, D. W. **Modern farm power.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971. 256p.

RDS TECHNOLOGY. **Calibration instructions.** London: RDS, 1996. 35p.

ROBIN, P. **Segurança e ergonomia em maquinaria agrícola.** São Paulo: Fundacentro, 1987. 24p.

RODRIGUES, V.L. G. S.; SILVA, J. G. Acidentes de trabalho e modernização da agricultura brasileira. São Paulo: In: **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v.14, n. 56, p.28-39, maio 1986.

SANTOS, N. C. Estabilidade estática de tratores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, São Paulo, 1983. **Anais.** São Paulo: SBEA, 1983. p.1661-1669.

- SILVEIRA, G. M. Saber operar implica também em segurança. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v.3, n.31, p.56-58, jun. 1979.
- SILVEIRA, G. M. **Os cuidados com o trator**. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1988. 245p.
- SMITH, D. W.; LILJEDAHN, J.B. Simulation of rearward overturning of farm tractors. **Transactions of the ASAE**, v.15, n.3, p.818-821, 1972.
- SMITH, H. P. ; WILKES, L. H. **Maquinaria y equipo agrícola**. Barcelona: Ediciones Omega, 1979. 520p.
- SPENCER, H. B. Stability and control of two-wheel drive tractors and machinery on sloping ground. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.23, p.169-188, 1978.
- SPENCER, H. B.; GILFILLAN, G. An approach to the assessment of tractor stability on rough sloping ground. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.21, p.169-176, 1976.
- SPENCER, H. B.; OWEN, G. M. A device for assessing the safe descent slope of agricultural vehicles. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.26, p.277-286, 1981.
- SPENCER, H. B.; OWEN, G. M.; GLASBEY, C.A. On-site measurement of the stability of agricultural machines. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.24, p.81-91, 1985.

SPENCER, H. B.; OWEN, G. M.; GREENHILL, A. L.. A microprocessor-based safe descent slope meter. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.28, p.277-286, 1983.

TOSELLO, A. **Tratores e maquinaria agrícola**. Belo Horizonte: Universidade Rural do Estado de Minas Gerais, 1960. 32p.

Pesquisa vai identificar acidentes envolvendo máquinas agrícolas entre 1995 e 99. **UNESP Rural**, v.4, n.18, p.25-26, 2000.

WERNECK, M. M. **Transdutores e Interfaces**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996. 225p.

YAMASHITA, R. Fundacentro distribui manual de prevenção no interior. **Agrofolha**, São Paulo, 2 out. 1998. p14-15.