**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Desenvolvimento de um sensor para avaliar a pressão exercida ao
solo decorrente do tráfego de máquinas agrícolas**

Áureo Santana de Oliveira

**Dissertação apresentada, para obtenção do título
de Mestre em Ciências. Área de concentração:
Máquinas Agrícolas**

**Piracicaba
2010**

Áureo Santana de Oliveira
Engenheiro de Controle e Automação

**Desenvolvimento de um sensor para avaliar a pressão exercida ao solo
decorrente do tráfego de máquinas agrícolas**

Orientador:
Prof. Dr. **TOMAZ CAETANO CANNAVAM RIPOLI**

Dissertação apresentada, para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Máquinas
Agrícolas

**Piracicaba
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Oliveira, Áureo Santana de

Desenvolvimento de um sensor para avaliar a pressão exercida ao solo decorrente do tráfego de máquinas agrícolas / Áureo Santana de Oliveira. - - Piracicaba, 2010.
87 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.
Bibliografia.

1. Compactação do solo 2. Máquinas agrícolas 3. Tração motorizada I. Título

CDD 631.3
O48d

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

A Deus, por estar presente na minha vida, em meu coração e me ajudar a seguir.

OFEREÇO

DEDICO,

Aos meus pais Manoel e Marinalva pelos ensinamentos, formação de caráter, valores e o apoio que jamais faltou.

Minha irmã querida Aline e meu querido sobrinho Gabriel pela amizade e carinho.

E em especial para minha esposa Juliana, pelo amor, incentivo, cumplicidade, e pela força inesgotável que você me deu nos momentos difíceis, durante esta jornada.

Amo todos vocês!!!

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em especial ao Departamento de Engenharia de Biossistemas pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

Ao Prof. Dr. Tomaz Caetano Cannavam Ripoli quem me incentivou, pela orientação, amizade solícita, ensinamentos, pelas oportunidades de crescimento pessoal e profissional e pela confiança.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas pelo conhecimento transmitido, pelas críticas e sugestões.

Aos colegas de pós-graduação em máquinas agrícolas, em especial a Felipe (Ingua), Vanderson, Franz (Betão), Guilherme (Berolo), Diego (Fulero), Gustavo (Gaúcho), Hudson, João (Arrombado), Marcio, Gilda, Mateus, Luis (Lost), Wellington (Peixão Ensaboado), José Vitor e Fabrício (Gabiru) pela amizade e troca de experiências.

Em especial aos companheiros de trabalho do setor de mecânica, pelo espírito de equipe e apoio essencial para realização deste trabalho, Francisco (Chicão), Afonso (ô Meu), José Geraldo, Agnaldo e ao Juarez pelas sugestões e amizade.

As secretárias do LEB Fernanda, Beatriz, Sandra, Davilmar e Lúcia, pela amizade, respeito e atenção.

Aos professores que fizeram parte da banca de defesa e suplentes por se prontificarem a apreciar este trabalho, bem como pelas sugestões e críticas que contribuíram para o enriquecimento do conteúdo científico desta dissertação.

A equipe da Biblioteca e secretaria da Pós-Graduação, pelo atendimento, competência e atenção.

A Usina Nossa Senhora Aparecida (Grupo Virgolino de Oliveira) por ter cedido trator e transbordo utilizados durante os ensaios.

A empresa Atech Sistemas Inteligente, por ter cedido a esteira metálica durante os ensaios.

Gostaria também de agradecer aos amigos, os quais eu posso contar em todos os momentos da minha caminhada: Cristiano Sartori (Krek), Thiago Sabbadin, André Cleto (Kbeça), Emidio Oliveira (Capitão) e suas respectivas esposas.

E, a todos aqueles que me acompanharam e contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	13
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Compactação do solo	23
2.2 Métodos de avaliação da compactação do solo	25
2.3 Tráfego de máquinas	32
2.4 Transdutores e Sensores.....	35
2.4.1 Tipos de Transdutores.....	35
2.4.2 Sensor de Pressão	36
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1 Desenvolvimento do sensor.....	39
3.2 Sistema de aquisição de dados	43
3.3 Linearidade do sensor.....	44
3.4 Aplicação do sensor.....	45
3.5 Determinação da área de contato.....	51
3.6 Avaliação da pressão exercida ao solo.....	53
3.7 Mensuração da Força de Tração	56
3.8 Mensuração do índice de cone (IC)	58
3.9 Determinação da força para deslocar a esteira em suspensão	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 Umidade e Granulometria	61
4.2 Área de contato com o solo.	62
4.3 Linearidade do sensor.....	66
4.4 Pressão exercida ao solo.....	67
4.5 Força de tração.....	74
4.6 Força de deslocamento da esteira em suspensão.....	75

4.7 Índice de cone	76
5 CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS	83

RESUMO

Desenvolvimento de um sensor para avaliar a pressão exercida ao solo decorrente do tráfego de máquinas agrícolas

Nas últimas décadas, os avanços na agricultura se destacam principalmente por meio da mecanização e pela eletrônica embarcada, a qual otimizou os processos e viabilizou redução de custos. No entanto, a massa cada vez mais crescente e o intenso tráfego desses equipamentos promovem a compactação do solo, resultando em prejuízos ao setor agrícola. Neste sentido, os objetivos deste trabalho foi desenvolver sensores que permitam avaliar, as pressões exercidas ao solo decorrentes do tráfego de máquinas e implementos agrícolas e empregá-lo em um estudo para verificar os efeitos da esteira metálica instalada sobre pneus de alta flutuação em ambiente agrícola, bem como a variação na força de tração de acordo com o rodado utilizado. Sendo a hipótese 1 do trabalho, de que esteiras conferem menor pressão sobre solo devido à maior área de contato, resultando em menor compactação e a hipótese 2 de que a utilização das esteiras leva a maior exigência tratorária. O desenvolvimento dos sensores e a condução do ensaio foram realizados no campus da ESALQ/USP, as esteiras metálicas foram instaladas sobre os pneus de BPAF de um transbordo de cana-de-açúcar preenchido com solo, para simular uma carga 7500 kg. O ensaio foi dividido em 02 tratamentos (Pneu BPAF e Esteira Metálica), com 04 passadas sucessivas do transbordo carregado sobre os sensores dispostos no solo, na horizontal, vertical e diagonal. Foram determinadas as áreas de contato dos dois tipos de rodado, por meio de imagem digital e mensurada a força de tração exercida pelo transbordo carregado e vazio. Com base nos resultados de pressão exercida ao solo, observou-se uma diminuição de 50% da pressão superficial utilizando esteiras metálicas comparada com os pneus BPAF, em contrapartida a força de tração do transbordo utilizando esteira metálica foi 137% maior. Portanto conclui-se que o sensor desenvolvido foi capaz de estimar os picos e as pressões residuais exercidas ao solo em diferentes profundidades e ficaram comprovadas as hipóteses do trabalho.

Palavras-chave: Compactação; Força de tração; Área de contato; Aquisição de dados

ABSTRACT

Development of a sensor to measure the stress on soil due to agricultural machinery traffic

In recent decades, advances in agriculture are distinguished mainly by mechanization and onboard electronics, which enabled streamlined processes and reduced costs. However, the increasing mass and heavy traffic of these equipments promote soil compaction, resulting significant agricultural losses. This work aimed to develop sensors to assess the stress on soil, resulting from traffic and agricultural machinery and, use them in a study to verify the metal tracks effects installed on high flotation tires on agricultural environment, as well as the variation in traction force according to the used tires. This study considered the following hypothesis: 1. metal tracks give less stress on soil due to greater contact area, resulting in less compaction; 2. the use of metal tracks leads to a greater demand of tractors. The development of sensors and trial conduction were held on ESALQ / USP campus. The metal tracks were installed on the tires of the sugarcane transshipment filled with soil to simulate a load of 7500 kg. The test was divided into 02 treatments (High Flotation Tire and Metal Tracks), with 04 transshipment successive passes loaded on the sensors horizontally, vertically and diagonally placed on soil. The contact areas of the two types of tires were determined through digital imaging and the traction force exerted by loaded and empty transshipment. Considering the stress results on soil, there was a decrease of 50% of the surface stress using metal tracks compared to the tires. However the transshipment traction force using a metal tracks was 137% higher. Therefore, the developed sensor was able to estimate the peaks and the residual stress exerted on soil at different depths and the hypothesis were confirmed.

Keywords: Compaction, Traction force, Contact area; Data Acquisition

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sensor de pressão AgTech (TURNER et al.,2001)	29
Figura 2 - Transdutor de estado de estresse (SST) - (PYTKA, 2009)	29
Figura 3 - Esboço do sensor de pressão (a) e esquema da sua instalação (b) (KELLER; ARVIDSSON, 2004)	30
Figura 4 - Sistema para determinação da pressão em 03 profundidades (KELLER; ARVIDSSON, 2004)	30
Figura 5 - Sensor de pressão tipo membrana (Adaptado de BRAGA, 2007)	36
Figura 6 - Sensor de pressão com semicondutores (Adaptado de BRAGA, 2007)	37
Figura 7 - Sensor de pressão capacitivo (Adaptado de BRAGA, 2007)	37
Figura 8 - Sensor de pressão piezoelétrico (Adaptado de BRAGA, 2007)	38
Figura 9 - Transdutor de pressão MPX-5700DP	40
Figura 10 - Dimensões (mm) do transdutor de pressão MPX-5700DP (Fonte, Catálogo do fabricante)	41
Figura 11 - Dimensões (mm) das calhas de metal, desenvolvidas para o estudo e diâmetro do tubo plástico do sensor.....	42
Figura 12 - Proteção do transdutor de pressão	42
Figura 13 - Sistema de aquisição de dados – CR10-X.....	44
Figura 14 - Equipamento para ensaios de tração e compressão, para fins de calibragem do transdutor	45
Figura 15 - Área de ensaio com preparo periódico de solo adequado para plantio de cana-de-açúcar	46
Figura 16 - Esteira metálica instalada sobre os pneus BPAF.....	47
Figura 17 - Transbordo de cana-de-açúcar picada – Sermag (SMR 8500)	47
Figura 18 - Dimensões (mm) do transbordo de cana-de-açúcar (Fonte, catálogo do fabricante)	48
Figura 19 - Carregamento do transbordo com solo	49
Figura 20 - Pesagem com balanças de plataforma do transbordo vazio	49
Figura 21 - Pesagem com guincho do transbordo carregado.....	50

Figura 22 - Pesagem com célula de carga das esteiras metálicas	51
Figura 23 - Condição após aplicação de gesso em pó.	52
Figura 24 - Imagem da área de contato de uma esteira com escala referencial para análise no AutoCAD 2006.....	52
Figura 25 - Imagem para determinação da área de contato do pneu dianteiro.....	53
Figura 26 - Imagem para determinação da área de contato do pneu traseiro.	53
Figura 27 - Sensor de pressão.....	54
Figura 28 - Sensores dispostos na horizontal, antes do cobrimento com solo	55
Figura 29 - Trincheira aberta e sensores dispostos na vertical.....	55
Figura 30 - Trincheira aberta e sensores dispostos na diagonal.....	56
Figura 31 - Ensaio de tração do conjunto fonte de potência + transbordo	57
Figura 32 - Ensaio de tração do conjunto fonte de potência + transbordo sobre solo compactado	58
Figura 33 - Determinação da força de atrito de rolamento da fonte de potência	58
Figura 34 - Obtenção do índice de cone ao lado das trincheiras e sensores.....	59
Figura 35 - Determinação da força de deslocamento com esteira suspensa.....	60
Figura 36 - Determinação da área de contato da esteira por meio do software AutoCAD 2006.....	63
Figura 37 - Determinação da área de contato do pneu do 1º eixo (dianteiro).....	63
Figura 38 - Determinação da área de contato do pneu do 2º eixo (traseiro).....	64
Figura 39 - Gráfico das áreas de contato total de dois pneus e de uma esteira	65
Figura 40 - Pressão superficial exercida pelos sistemas de esteira e pneu	65
Figura 41 - Gráfico de linearidade sensor 1	66
Figura 42 - Gráfico de linearidade sensor 2	66
Figura 43 - Gráfico de linearidade sensor 3	67
Figura 44 - Gráfico de linearidade sensor 4	67
Figura 45 - Pressão exercida no solo, utilizando pneu BPAF e sensores dispostos na horizontal	68
Figura 46 - Pressão exercida no solo, utilizando esteiras metálicas e sensores dispostos na horizontal	68

Figura 47 - Pressão exercida no solo, utilizando pneu BPAF e sensores dispostos na vertical	69
Figura 48 - Pressão exercida no solo, utilizando esteira metálica e sensores dispostos na vertical	69
Figura 49 - Pressão exercida no solo, utilizando pneus BPAF e sensores dispostos na diagonal.....	70
Figura 50 - Pressão exercida no solo, utilizando esteira metálica e sensores dispostos na diagonal.....	70
Figura 51 - Picos de pressões exercidas a 0,1 m no perfil do solo, com os sensores na diagonal.....	72
Figura 52 - Picos de pressões exercidas a 0,2 m no perfil do solo, com os sensores na diagonal.....	72
Figura 53 - Picos de pressões exercidas a 0,3 m no perfil do solo, com os sensores na diagonal.....	72
Figura 54 - Pressão residual média após as passagens dos rodados na profundidade de 0,1m	73
Figura 55 - Pressão residual média após as passagens dos rodados, na profundidade de 0,2 m	73
Figura 56 - Pressão residual média após as passagens dos rodados, na profundidade de 0,3 m	74
Figura 57 - Força de deslocamento da esteira em suspensão	76
Figura 58 - IC esteira e pneu com sensores na horizontal.	77
Figura 59 - IC esteira e pneu com sensores na vertical.....	77
Figura 60 - IC esteira e pneu com sensores na diagonal.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do transdutor de pressão MPX-5700DP	40
Tabela 2 - Especificações básicas do sistema de aquisição de dados (CR10-X)	44
Tabela 3 - Dados de umidade e granulometria a 0,1 m	61
Tabela 4 - Dados de umidade e granulometria a 0,2 m	62
Tabela 5 - Dados de umidade e granulometria a 0,3 m	62
Tabela 6 - Soma das áreas de contato de uma esteira	63
Tabela 7 - Soma das áreas de contato de dois pneus	64
Tabela 8 - Dados ensaio de tração com pneu e esteira	74
Tabela 9 - Força de deslocamento com a esteira em suspensão	75

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico na área de mecanização dos sistemas agrícolas a partir da Segunda Guerra Mundial, contribuiu para o desenvolvimento de máquinas e equipamentos mais eficientes, com melhorias significativas no sistema de tração e incremento na potência, como é o caso dos tratores com tração nas quatro rodas. Trabalhos existentes na bibliografia relatam que a massa e a potência dos tratores têm aumentado ao longo do tempo, embora a relação entre os dois fatores tenha diminuído, prejudicando o potencial produtivo e o desempenho do trator (LANÇAS, 2002).

A utilização de máquinas e equipamentos agrícolas tem por finalidade a otimização de desempenhos operacionais e redução de custos, entretanto seu emprego de forma imprópria pode causar impactos negativos ao ambiente e aos recursos naturais. Um destes impactos negativos é a compactação do solo definida como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes, reduzindo o volume ocupado por uma determinada massa do solo e o tamanho dos poros que permitem livre circulação de água e ar, chamados macroporos (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Ripoli et al. (2005) defende uma linha que solo fértil é aquele que apresenta condições básicas e balanceadas referente à água, calor, oxigênio, permeabilidade das raízes, pH e nutrientes, enfatizando a questão da compactação (ação direta na permeabilidade das raízes) faz parte das variáveis que definem um solo fértil. O solo agrícola constitui um organismo vivo, onde as plantas devem encontrar condições adequadas para germinar, emergir e se desenvolver durante seu ciclo vegetativo, beneficiando-se das interações biológicas no volume de solo explorado pelas raízes. Tais interações somente existem e são favoráveis quando o solo possui aeração adequada além de boas condições para infiltração e percolação de água e fertilizantes. Portanto, a intensificação da mecanização na agricultura e a tendência de uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas trazem o risco de danos à capacidade produtiva do solo e, conseqüentemente, à viabilidade da produção agrícola.

A compactação no perfil do solo se dá de forma diferenciada, onde a incidência de compactação no horizonte superficial do solo é determinada pela pressão de contato entre o solo e as rodas, enquanto que em subsuperfície a carga do eixo torna-se o fator

mais importante (HÅKANSSON; VOORHEES, 1988). Além disso, a compactação depende de outros fatores destacando-se a textura do solo (IMHOFF et al 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água do solo durante as operações de campo (HORN et al., 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN et al., 1995; CHAMEN et al., 2003). Desta forma, o estudo da compactação do solo torna-se abrangente e complexo em todo cenário agrícola.

A compactação do solo tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores, sendo constatado que os seus efeitos sobre a estrutura física do solo acarretam, na maioria das vezes, na redução da produtividade das culturas. Sob condições onde a compactação anual é intensa e os processos naturais de descompactação, como ciclos de umedecimento e secamento são insignificantes, há um grande risco de que os efeitos da compactação sejam acumulados durante anos (VAN DEN AKKER et al., 2003). Apesar da grande diversidade de metodologias e objetivos, uma motivação comum nestes estudos, é a de estimar e classificar a intensidade da compactação do solo pelo tráfego, e auxiliar a partir dessas informações a tomada de decisão, visando a redução do risco de compactação excessiva do solo.

A estimativa da compactação significa prever o estado físico final do solo, após a passagem de uma máquina, a partir de informações iniciais do solo e da máquina. A condição física final do solo reflete o nível de compactação do solo e seu estado de degradação. Nessa conjuntura, pode-se afirmar que o produtor agrícola deve aprender a conviver com a possibilidade de ocorrência da compactação e procurar agir de modo a evitá-la e preveni-la, ao invés da sua remediação (LARSON et al., 1994).

Uma extensa quantidade de atributos do solo tem sido empregada para caracterizar a compactação, destacando-se a densidade aparente, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração ou ao cisalhamento, condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e geometria do rasto do pneu. Em geral, estas propriedades são medidas antes e imediatamente após o tráfego, em diferentes profundidades e as alterações verificadas servem como indicadores da intensidade e distribuição da compactação no solo (SOANE et al., 1981 apud ARAUJO, 2004).

Outro parâmetro utilizado para caracterizar a compactação no solo é a mensuração da pressão exercida ao solo, por rodados de máquinas e implementos agrícolas, utilizando-se de diversos tipos de sensores. Carrier et al. (1995) descrevem o desenvolvimento de um sensor para medir a pressão superficial, utilizando um dispositivo fechado preenchido com um fluido acoplado a um transdutor de pressão. Turner et al. (2001), usaram bulbos preenchidos com um fluido, conectado a transdutores de pressão para obter os valores máximos de pressão e desenvolveram um procedimento de colocação rápida para aumentar a taxa de amostragem. Em alguns estudos eliminou-se o processo de instalação dos sensores, usando combinações de transdutores de pressão fixados diretamente no pneu ou na superfície do solo, porém não permitindo a determinação da pressão nas camadas mais profundas (DEGIRMENCIOGLU et al., 1997, SMITH et al., 1994).

Neste contexto o presente trabalho teve como objetivos desenvolver um sensor simples, confiável e que possibilite avaliar as pressões exercidas ao solo, decorrentes do tráfego de máquinas e implementos agrícolas e verificar os efeitos da esteira metálica instalada sobre pneus de alta flutuação em ambiente agrícola, bem como a variação na força de tração exercida de acordo com o rodado utilizado. Sendo a hipótese primária, de que esteiras metálicas conferem menor pressão sobre solo devido à maior área de contato, resultando, portanto, em menor compactação. A hipótese secundária de que a utilização de esteira metálica sobre pneus BPAF exige maior força de tração para seu deslocamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compactação do solo

A compactação do solo, causada pelo de tráfego de máquinas e implementos agrícolas, tem sido um amplo objeto de estudo. Entretanto, com o advento de máquinas cada vez mais pesadas, maiores e mais sofisticadas tecnologicamente, surge a necessidade de realizar novas pesquisas com intuito de criar subsídios para tomadas de decisões com o objetivo de evitar ou amenizar a degradação do solo.

O rearranjo físico das partículas do solo que caracteriza a compactação, pode ser provocado por causas internas ou externas ao solo. No primeiro caso, pode-se citar, por exemplo, a contração do solo causada pela secagem do mesmo ou sua expansão pelo congelamento. No segundo, a aplicação de forças externas de compressão, representadas pelo peso de animais ou máquinas agrícolas, constitui o exemplo mais comum (ARAUJO; SARAIVA, 2004). Segundo Kooistra e Tovey (1994), a compactação é um processo de modificação da estrutura do solo em reação às forças externas aplicadas, onde a rede de poros sofre um rearranjo com conseqüências para o movimento de água e ar no solo. Após o tráfego, os macroporos do solo têm seu tamanho reduzido e suas geometrias alteradas, podendo inclusive fechar ou desaparecer completamente. De acordo com Lanças (2000), a compactação do solo não é uma propriedade do solo e sim o efeito da variação de algumas de suas propriedades, devido à ação de cargas externas, tais como o tráfego de máquinas e a ação de ferramentas agrícolas.

Isso se traduz em efeitos detrimenais no solo, reduzindo o crescimento radicular devido à alta resistência à penetração das raízes. A infiltração de água no solo é reduzida e a absorção de nutrientes pelas plantas por meio das raízes é afetada. Ademais, é comum a prática de aumentar o suprimento de nutrientes e água (irrigação), para compensar os efeitos adversos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas, o que resulta num aumento do custo de produção, além de levar ao rebaixamento dos níveis do lençol freático e poluir o ambiente (HÅKANSSON; VOORHEES, 1998; VAN DEN AKKER et al., 2003).

Vários pesquisadores sugerem que a compactação na camada superficial do solo até 0,25 m de profundidade, está relacionada com pressão exercida entre o rodado e a superfície de contato, enquanto que a compactação subsuperficial está mais relacionada à carga por eixo das máquinas (SMITH; DICKSON , 1990; LAGUË; AGNEW; KHELIFI, 2003).

Esses efeitos da compactação do solo podem ser benéficos em ambientes áridos e solos arenosos, pois, compactações leves podem colaborar no sentido, de reduzir perdas de água por percolação profunda e aumentar o armazenamento de água para as plantas, aumentando a eficiência da irrigação e da chuva (KAYOMBO; LAL, 1994). Além disso, certo nível de compactação em torno das sementes é necessário para assegurar uma boa germinação e reduzir a erosão.

Entretanto, os efeitos negativos da compactação do solo, provocam preocupações, principalmente nas plantas cultivadas e no ambiente. No caso das plantas, camadas de solo excessivamente compactadas dificultam a penetração das raízes e, conseqüentemente, promovem uma redução no volume de solo explorado pelas mesmas, deixando as plantas suscetíveis à falta de água e nutrientes. A deterioração da estrutura do solo devido à compactação depende de vários fatores, destacando-se a textura do solo (IMHOFF et al., 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água do solo durante as operações de campo (HORN et al., 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN et al., 1995; CHAMEN et al., 2003).

A textura influencia o comportamento do solo submetido a pressões externas, pois determina o atrito entre as partículas e o tipo de ligação entre elas. Em geral, quanto maiores as partículas do solo, menor sua compressibilidade e agregação (HORN; LEBERT, 1994).

A estrutura do solo refere-se à organização de suas partículas sólidas e à geometria do espaço poroso. A existência de agregados de partículas primárias do solo depende, geralmente, da ocorrência de agentes cimentantes que podem ser a argila, a matéria orgânica e os óxidos de ferro e alumínio, estes últimos comuns em solos tropicais (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Solos bem estruturados apresentam agregados com maior estabilidade à variação de umidade do solo.

O teor de água é um importante fator, que determina a possível intensidade de deformação que pode ocorrer no solo no momento da aplicação da pressão, pois atua como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento das mesmas, o qual é favorecido à medida que a umidade aumenta (SILVA et al., 2000). Ao contrário, solos secos apresentam menor deformação com o tráfego de máquinas resultando em baixos níveis de compactação.

Portanto, a estimativa da compactação e a classificação do nível de compactação do solo após o tráfego, constituem informações fundamentais para a tomada de decisão relacionada à prevenção.

2.2 Métodos de avaliação da compactação do solo

Os efeitos da compactação pelo tráfego são avaliados medindo-se a intensidade das alterações nas propriedades físicas do solo. No entanto, não existe um parâmetro de medição que reflita de forma completa e abrangente todas as conseqüências da compactação, bem como não há concordância quanto aos critérios para estabelecimento de níveis ou valores críticos de compactação do solo. Existe uma incerteza associada à representação precisa da compactação do solo uma vez que não existe uma medida adequada da mesma, devido à grande diversidade de condições de solo, clima, máquinas, culturas exploradas e sistemas de produção existentes o que torna difícil estabelecer relações válidas generalizadas entre estes fatores e, conseqüentemente prever as respostas do solo e das plantas às cargas aplicadas pelas máquinas (ARAUJO; SARAIVA, 2004).

As propriedades do solo alteradas com a compactação são geralmente mensuradas antes e após um evento de compactação. A densidade e a porosidade do solo constituem os parâmetros de maior importância na avaliação da compactação, por descreverem diretamente a proporção de volume do solo disponível para as raízes das plantas, a água e o ar que elas requerem (MANTOVANI, 1984).

Os métodos para avaliação da camada compactada do solo podem ser divididos, de acordo com Lanças (1996) e Ripoli et al. (2005) em três grupos principais:

a) Métodos visuais, subjetivos ou grosseiros

Neste grupo, os principais sinais que indicam o efeito da compactação são:

- Demora de emergência das plantas;
- Plantas mais baixas que o normal;
- Folhas com coloração não-característica;
- Sintomas de deficiência nutricional em solos bem adubados;
- Sistema radicular raso, espalhado e pouco desenvolvido;
- Formação de crosta na superfície do solo;
- Zona compactada de superfície;
- Água empoçada;
- Erosão excessiva pela água;
- Aparecimento de sulcos de erosão;
- Surgimento de fendas na superfície do solo ou nos rastros dos tratores;
- Aumento de requerimento de potência para o preparo do solo;
- Aumento da "dificuldade" de penetração de um objeto pontiagudo ao longo do perfil do solo;
- Aumento do esforço necessário para a penetração de um trado.

b) Métodos precisos

Os métodos utilizados envolvem análises de laboratório que, na maioria, foram descritas por Kiehl, citado por Lanças (1996):

- Densidade do solo;
- Percentagem de macroporos.

c) Métodos intermediários

Nestes métodos estão os indicadores secundários da compactação do solo:

- Taxa de difusão de oxigênio;
- Condutividade hidráulica saturada;
- Resistência à penetração.

A resistência à penetração depende das seguintes características do penetrômetro: ângulo e diâmetro do cone, rugosidade da superfície e velocidade de

penetração. Alguns desses fatores são padronizados por normas específicas: ASAE¹ S313.3 (1999) e ASAE EP542 (1999).

A resistência do solo à penetração tem sido freqüentemente utilizada como indicador de compactação do solo em sistemas de manejo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (TORMENA; ROLOFF, 1996; MERCANTE et al., 2003).

Os aspectos do solo que influenciam a resistência à penetração são a densidade, textura, matéria orgânica e, principalmente, a umidade. O uso do penetrômetro como indicador de compactação deve ser feito com cuidado devido à sua dependência em relação à umidade do solo e às complexas relações com as demais características do solo (O'SULLIVAN et al., 1987).

Camargo e Alleoni (1997) admitem que quando a resistência à penetração é menor do que 1,1 MPa não há limitação ao crescimento radicular, sendo o solo considerado como muito baixa resistência, enquanto que para valores entre 1,0 e 2,5 MPa, a resistência deve ser considerada baixa, ocorrendo pouca limitação ao crescimento radicular. Canillas e Salokhe (2002), com base em revisão bibliográfica, empregaram uma faixa ampla de resistência à penetração, considerando que valores menores ou iguais a 1 MPa representam nenhuma restrição e valores iguais ou superiores a 10 MPa são totalmente restritivos. Entre estes dois limites, propuseram uma equação de segundo grau relacionando um coeficiente de compactação adimensional, variável de 0 a 1, e o valor medido de resistência. Valores entre 0,8 e 1,0 do coeficiente de compactação, segundo os autores, representam condições ótimas para o desenvolvimento das plantas e, abaixo de 0,5, más condições.

A pressão de preconsolidação é outro parâmetro utilizado principalmente para indicar a capacidade de suporte de carga do solo, e conseqüentemente, o risco de compactação do mesmo (HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF et al., 2004; RUCKNAGEL et al., 2007). Esse parâmetro é baseado na curva de compactação do solo e foi desenvolvido por Casagrande (1936) citado por Dias Junior et al. (2004). Conforme Håkansson e Voorhees (1988) a pressão de preconsolidação é um parâmetro que pode

¹ ASAE - American Society of Agricultural Engineers, hoje chamada ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers.

permitir conclusões valiosas sobre as influências cumulativas de pressões de compactação prévia, ou seja, o histórico de pressões no qual o solo foi submetido no passado, bem como indicar mudanças nas propriedades físicas do solo causadas por tal compactação.

A pressão de preconsolidação é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (LEBERT; HORN, 1991; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995). Deformações elásticas e reversíveis são observadas quando a pressão aplicada ao solo for menor que a pressão de preconsolidação. Quando a força exceder a este valor, as deformações serão irreversíveis e plásticas (HORN; LEBERT, 1994). A pressão de preconsolidação deve ser a pressão máxima aplicada ao solo para que a compactação adicional seja evitada. Reflete a história de tensão do solo, indicando a maior pressão que o solo já suportou no passado (MCNABB; BOERSMA, 1996; ASSOULINE et al., 1997; OLIVEIRA et al., 2003). Valores elevados de pressão de preconsolidação implicam geralmente em condições favoráveis para o tráfego e inadequadas para o crescimento das raízes (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999).

A pressão exercida no solo é um parâmetro que pode ser medido em tempo real e usado como um indicador da gravidade e os efeitos de um evento de compactação. Esta pressão geralmente aplicada ao solo devido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas tem sido objeto de estudos de vários pesquisadores. Segundo Turner et al. (2001), os dados de sensores de pressão sob o solo mostram que o estresse residual, ou o estresse líquido remanescente após a passagem de um veículo sobre o sensor instalado no solo, é proporcional ao pico de pressão. Sendo uma maneira simples de medir e comparar a compactação do solo entre os diferentes veículos ou tratamentos, o sensor utilizado está apresentado na Figura 1.

Harris e Bakker (1994) desenvolveram um transdutor de pressão do solo (*Soil Stress Transducer*, SST) para medir as tensões normais em seis direções diferentes (Figura 2). O transdutor de tamanho relativamente pequeno, com suas seis faces em uma esfera de diâmetro aproximado de 40 mm, é de simples de fabricação, robusto e de uso confiável. Sua instalação é feita com um furo horizontal, usando uma técnica que garante que ele esteja em pleno contato com o solo. Os testes de campo

mostraram que, em conjunto com um sistema aquisição de dados foi capaz de medir detalhadamente as tensões no solo e calculadas as pressões exercidas pelos rodados.

Figura 1 - Sensor de pressão AgTech (TURNER et al.,2001)

Figura 2 - Transdutor de estado de estresse (SST) - (PYTKA, 2009)

A distribuição da pressão vertical abaixo da área de contato dos pneus com o solo foi medida por Keller e Arvidsson (2004) por meio de cinco sensores de pressão que foram enterrados no solo até 0,1 m de profundidade. Cada sensor (DS Europa

Série BC 302) foi anexado a um disco de alumínio (diâmetro: 17,5 mm, altura: 5,5 mm) incorporado no centro de um disco maior alumínio (diâmetro de 70 mm, altura: 15 mm), conforme a Figura 3a. As células foram colocadas em uma linha perpendicular à direção do tráfego sob a metade da faixa do rodado. Uma célula foi colocada abaixo do centro do pneu, uma abaixo da borda do pneu, e as células restantes foram colocados entre elas, como pode-se observar na Figura 3b.

Figura 3 - Esboço do sensor de pressão (a) e esquema da sua instalação (b) (KELLER; ARVIDSSON, 2004)

A pressão vertical do solo em profundidades maiores foi mensurada por meio da instalação horizontal de sondas no solo que também utilizam a célula de carga DS Europa Série BC 302, a partir de um poço cavado, que foi de aproximadamente 1,5 m de comprimento, 1 m de largura e 1 m de profundidade, com as paredes estabilizadas com placas de madeira (Figura 4). As sondas foram instaladas por furos que foram estabilizados com a inserção de um tubo de aço com o diâmetro 58 mm. Foram utilizadas 03 sondas instaladas, normalmente, 0,3, 0,5 e 0,7 m de profundidade. A distância entre a parede do poço e a sonda foi de aproximadamente 1,1 m.

Figura 4 - Sistema para determinação da pressão em 03 profundidades (KELLER; ARVIDSSON, 2004)

Carrier et al. (1995), descreve o desenvolvimento de um sensor para medir a pressão superficial, utilizando um dispositivo de borracha fechado preenchido com um fluido envolvido parcialmente por uma calha de metal acoplado a um transdutor de pressão.

Outros pesquisadores eliminaram o processo de instalação dos sensores no solo, instalando-os diretamente no pneu ou na superfície do solo, onde ocorre o tráfego (SMITH et al., 1994; DEGIRMENCIOGLU et al., 1997). Esses dispositivos são específicos para medir as pressões exercidas na superfície do solo, não sendo possível medir a distribuição das pressões em profundidade.

Gysi et al. (2001) mostraram que o estresse medido por sondas é um bom indicador do tensão média normal. Entretanto a mensuração da tensão no solo com transdutores de estresse é acompanhada por diversos problemas, como discutido por Trautner (2003). A pré-condição para medições confiáveis de tensão é ter um bom contato entre o transdutor e o solo circundante. Isso pode ser difícil, especialmente em condições muito secas ou em solos arenosos (TRAUTNER, 2003). Obter um bom contato entre o transdutor e do solo é provavelmente mais difícil com um transdutor de estado de tensão (com seis faces, SST) do que com um transdutor vertical (com uma face).

A estimativa da tensão fornecida pelo transdutor é influenciada pela rigidez do transdutor, em comparação com o solo circundante (KIRBY, 1999). O tamanho do transdutor é outro fator que afeta as medições. Trautner (2003) observaram que a tensão mensurada foi muito maior quando os sensores de tensão foram colocados em uma placa de madeira em comparação com quando os sensores de tensão foram colocados diretamente no solo

Ao analisar os campos de tensão em torno de transdutores por meio da modelagem de elementos finitos, Kirby (1999) concluiu que os valores absolutos das medidas de tensão devem ser tratados com cautela. Além disso, observou que transdutores de estado de estresse (SST) podem superestimar as tensões mensuradas mais que os transdutores verticais e que a magnitude desta superestimação não é necessariamente a mesma em cada face.

2.3 Tráfego de máquinas

Segundo Ripoli et al. (2005), a diminuição dos macroporos por qualquer motivo ocasiona a compactação ou adensamento do solo prejudicando o desenvolvimento da cultura, quando esta diminuição de macroporos é ocasionada devida ação de tráfego de máquinas e implementos agrícolas é chamada de compactação. O adensamento (ocasionado por processos pedogenético) por sua vez, é mais comum em solos com menor intensidade de vida orgânica e sem cobertura vegetal, ficando exposto à ação de gotas de chuva e radiação solar.

O tráfego de máquinas é o fator (mais importante) externo causador da compactação do solo. As características do carregamento aplicado ao solo que influenciam o processo de compactação estão diretamente relacionadas às características das máquinas agrícolas, tais como, a carga no eixo da máquina, as dimensões, geometria, rigidez, patinamento e pressão de inflação dos pneus e a velocidade de operação (ABU-HAMDEH et al., 2000).

Abu-Hamdeh et al. (2000) analisando os efeitos de diferentes níveis de carga e de pressão de inflação de pneus concluíram que ambos os parâmetros apresentaram efeito significativo sobre a compactação do solo até uma profundidade de 0,5.

Håkansson et al. (1988) verificaram que um pneu relativamente flexível com uma pressão de inflação moderada operando em um solo moderadamente firme exerce uma pressão sobre o solo da mesma magnitude da pressão de inflação dos pneus, embora a rigidez da carcaça possa aumentar a pressão sobre o solo e distribuí-la desuniformemente. Nessas condições, as complexas interações pneu-solo determinam a pressão sobre o solo, a qual pode variar bastante ao longo da superfície de contato.

Estudando o efeito do tráfego de um trator com peso de 8,5 Mg em quatro tratamentos de compactação: 1- sem tráfego do trator; 2- com tráfego nas entrelinhas; 3- com tráfego nas linhas; e 4- com tráfego na área toda, Aladawi e Reeder (1996), concluíram que a produção de milho com tráfego na área toda foi significativamente menor que a produção nos demais tratamentos.

Tráfego de precisão é um sistema que visa manter a área de tráfego constante e limitada, com a padronização das bitolas de máquinas e implementos durante as

operações agrícolas, conseqüentemente criando zonas distintas de plantio e de tráfego. Esta prática geralmente aumenta a produtividade e o rendimento do trabalho de campo. Os caminhos firmemente compactados melhoram a tração e mobilidade das máquinas. O tráfego de precisão traz vantagens com relação a compactação, mas não a elimina (ALADAWI; REEDER, 1996).

Com a modernização da agricultura, a massa das máquinas e dos equipamentos assim como a intensidade de uso do solo tem aumentado drasticamente, em contrapartida o aumento da largura dos pneus não tenha alcançado reduções significativas da pressão dos mesmos sobre o solo. Esse processo não foi acompanhado por um desenvolvimento adequado às exigências de uma agricultura que deve tender continuamente à sustentabilidade, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo, de acordo com Streck et al. (2004) que avaliaram o efeito do tráfego de máquinas na alteração das propriedades físicas de um solo sob plantio direto e concluíram que o tráfego sobre o solo aumentou a densidade e a resistência do solo à penetração. As propriedades físicas do solo de uma propriedade rural onde foi utilizado o tráfego controlado por sete anos foram medidas por Wood et al. (1993). Verificou-se que, mantendo áreas separadas para o tráfego das máquinas, a zona das culturas apresentou menor densidade e maior porosidade e permeabilidade ao ar, beneficiando as plantas em comparação com as linhas de tráfego.

Raper e Kirby (2006) afirmam que uma forma muito útil de limitar a compactação de solo é separando-se as áreas usadas para crescimento de raiz das usadas para tráfego de veículo. Esse processo de cultivo denomina-se tráfego controlado. Laguë et al. (2003) definem de tráfego controlado como um sistema de produção no qual a área de cultivo e as pistas de tráfego são permanentemente separadas. Dessa forma, as pistas de tráfego são propositalmente compactadas e podem resistir ao tráfego adicional sem se deformar, assim a eficiência de tração dos pneus aumenta. Por sua vez, as áreas de produção entre as pistas são usadas exclusivamente para o plantio não sofrendo compactação pelo tráfego de veículos. Assim, a compactação é virtualmente eliminada, com exceção da compactação natural do solo e da provocada pelos implementos agrícolas, a qual fica, entretanto, minimizada no sistema de tráfego controlado. Outro benefício potencial do sistema de tráfego controlado é a eliminação

da necessidade de tratores de grande potência necessários às operações pesadas de cultivo, tais como subsolagem e aração.

A utilização do sistema de tráfego controlado representa uma alternativa interessante ao cultivo mecanizado convencional, visto que há uma redução total ou quase total na frequência de máquinas sobre a área de plantio. Na revisão feita por Laguë et al. (2003), relata-se que com a eliminação do tráfego nas áreas de cultivo há uma enorme contribuição para aumento da produtividade.

Por outro lado, o custo de investimento inicial é mais elevado neste sistema, devido ao alto custo dos equipamentos e às modificações e manutenção das áreas. Também se deve levar em conta a perda da área de produção que for destinada exclusivamente ao tráfego. A dificuldade inerente de implantar tais sistemas em terreno de maior declividade por causa de considerações de estabilidade também se torna uma das principais desvantagens (LAGUË et al., 2003).

Limitar as tensões geradas no solo pelo tráfego de máquinas, conforme a capacidade de suporte de cada solo tem sido o enfoque adotado por vários países europeus dentro de um contexto atual de reconhecimento da importância do solo como recurso natural não-renovável, o qual tem levado ao aumento da regulamentação para sua proteção e uso sustentável (VAN DEN AKKER; ARVIDSSON; HORN, 2003).

Håkansson e Medvedev (1995) comentam que a preocupação em limitar a sobrecarga nos solos com preparo periódico, deve se concentrar na compactação do subsolo, uma vez que o próprio preparo e os agentes naturais, geralmente aliviam a compactação na superfície. No entanto, ressaltam que em sistemas sem preparo é necessário também verificar efeitos de longo prazo da compactação superficial.

Os mesmos autores citaram estudos na Rússia onde foram propostos valores para pressões máximas em solos de textura fina considerando critérios mais simples, dentre eles, de que não poderia haver compactação abaixo de 30 cm e que o rebaixamento da superfície do solo pelo tráfego não poderia ser maior do que 2 cm, o que resultou em pressões máximas variando entre 30 e 120 kPa, dependendo da umidade do solo. Conforme Håkansson e Medvedev (1995) na Alemanha recomenda-se 2 Mg por pneu para evitar compactação no subsolo e 50 a 200 kPa de pressão no

solo para evitar compactação na superfície. Na Suécia, a recomendação máxima é de 6 Mg em eixos simples e 8 a 10 Mg em eixos duplos.

2.4 Transdutores e Sensores

Transdutor é um dispositivo que transforma uma forma de energia numa outra adequada para fins de medida, ou seja, mede uma forma de energia que esta relacionada à outra por meio de uma relação conhecida, utilizando para isso um elemento sensor. O Transdutor é um sistema completo que produz um sinal elétrico de saída que representa a grandeza física sendo medida (PAZOS, 2002). Segundo Groover (2008) um transdutor é um dispositivo que converte um tipo de variável física em outra forma. Uma conversão comum é para tensão elétrica, por ser mais conveniente para instrumentação e controle.

Um sensor é um dispositivo que detecta um estímulo físico (calor, luz, som, pressão, campo magnético, movimento) e transmite um impulso (mensurável ou operante) correspondente. Alguns sensores respondem com sinal elétrico a um estímulo, isto é, convertem a energia recebida em um sinal elétrico. Nesse caso, podem ser chamados de transdutores. O conjunto formado por um transdutor, um condicionador de sinal (amplificador) e um indicador é chamado de sistema de medição

Sensor é apenas a parte sensível do transdutor, que se completa em muitos casos com um circuito eletrônico para geração desse sinal elétrico que depende do nível de energia da grandeza física que afeta o dispositivo sensível (PAZOS, 2002).

2.4.1 Tipos de Transdutores

Os transdutores com saída em sinal elétrico podem ser classificados em dois tipos básicos, dependendo da forma do sinal convertido:

- Transdutores Analógicos: proporcionam um sinal analógico contínuo como tensão ou corrente elétrica. Esse sinal pode ser interpretado como o valor da variável física que esta sendo medida;

- Transdutores Digitais: produzem um sinal digital de saída na forma de um conjunto de bits paralelos ou uma série de pulsos que podem ser contados. De qualquer forma o sinal digital representa o valor da variável medida;
- Transdutores passivos são aqueles cuja energia de saída é proveniente unicamente (ou quase unicamente) da energia de entrada.
- Transdutores ativos são aqueles que dispõem de uma alimentação de energia. Neles, a maior parte da energia de saída é provida pela alimentação.

2.4.2 Sensor de Pressão

A pressão é uma grandeza analógica, existindo uma infinidade de tipos de sensores que podem convertê-la no movimento de uma agulha numa escala, em uma tensão elétrica, uma corrente elétrica, ou em outra grandeza que possa ser observada. Os três principais tipos de sensores de pressão que são usados nas aplicações práticas são os seguintes:

1. Membrana, os mais comuns de todos os sensores são os de membrana com configuração em ponte de Wheatstone. A construção de um sensor desse tipo é vista na Figura 5.

Figura 5 - Sensor de pressão tipo membrana (Adaptado de BRAGA, 2007)

Quando uma pressão é aplicada ao diafragma, ele se deforma com uma conseqüente alteração de sua resistência elétrica. Essa resistência pode, então, ser medida por um circuito externo.

Basicamente, existem três tipos de sensores de membrana, o primeiro é o de liga onde uma folha de metal forma uma liga com o diafragma, sendo sua resistência medida quando a pressão atua sobre o conjunto, dentre as vantagens desse tipo de sensor, temos a rápida resposta e a capacidade de operar numa faixa muito ampla de temperaturas. Os sensores do tipo pulverizado são fabricados pulverizando-se uma camada de vidro no diafragma e sobre ela colocando-se uma película de filme metálico. Esses sensores são ideais para ambientes rudes. O terceiro tipo é o que tem por base um semicondutor. Sensores sensíveis à pressão com materiais semicondutores podem ser elaborados, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Sensor de pressão com semicondutores (Adaptado de BRAGA, 2007)

Uma membrana pressiona um material semicondutor que altera suas características de condução conforme a pressão aplicada. Normalmente incluem um circuito integrado que processa seus sinais, sendo por isso muito simples de usar.

2. Capacitância: baseia-se na alteração da capacitância entre um diafragma que se deforma, e uma placa fixa no seu interior, conforme pode-se observar na Figura 7.

Figura 7 – Sensor de pressão capacitivo (Adaptado de BRAGA, 2007)

Com o aumento da pressão aplicada ao diafragma a armadura móvel que ele representa se aproxima da armadura fixa e, com isso, a capacitância do sensor aumenta. Apresenta uma resposta linear e estável e sensível à alta temperatura além de exigir circuitos mais complexos para processar o sinal que fornecem, ou seja, a capacitância.

3. Piezoelétricos: Uma membrana faz contato por meio de uma agulha com um cristal piezoelétrico, quando altera-se a pressão da agulha sobre o cristal o mesmo se deforma, gerando uma tensão elétrica que se exprime na sua saída, sendo diretamente proporcional à pressão da agulha sobre o elemento sensível sensor, a Figura 8 ilustra o esquema de um sensor piezoelétrico em corte.

Figura 8 – Sensor de pressão piezoelétrico (Adaptado de BRAGA, 2007)

A pressão é uma grandeza linear e na maioria dos casos, o sensor a converte para outra grandeza linear como a tensão ou a corrente, na maioria das aplicações a conversão linear numa é feita de 0 a 5 V para os dispositivos que operam com saída de tensão, e de 4 a 20 mA para os dispositivos que operam com saída de corrente.

A saída de corrente é especialmente interessante porque a precisão do sinal que se obtém no extremo de uma linha independe de sua resistência, o que não ocorre com a transmissão por tensão.

Nos sistemas modernos de controle e monitoramento de pressão, utiliza-se o computador, o que significa que os sinais na forma analógica precisam passar por um processamento adicional que consiste no hardware de aquisição de dados ou DAQ (*Data Acquisition*).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Desenvolvimento do sensor

O principal componente dos sensores desenvolvidos é um transdutor de pressão modelo MPX 5700DP, fabricado pela empresa Motorola, Inc. (Figura 9). A série MPX5700 de transdutores de pressão piezoresistivo é o estado da arte de sensores de pressão monolítico de silício projetado para uma ampla gama de aplicações, principalmente as que utilizam um microcontrolador ou microprocessador com conversores analógico digitais. Este transdutor de elemento único combina micro usinagem avançada e técnicas de metalização de filmes finos, e processamento bipolar para fornecer de forma precisa, alto nível de sinal de saída analógica, que é proporcional à pressão aplicada.

De acordo com o fabricante, este transdutor apresenta compensação interna de temperatura para mensuração precisa com temperaturas de 0 a 85 °C. Possui dois pontos de entrada de pressão, podendo ser utilizado para medição em um determinado ponto, bastando para isto deixar uma de suas entradas exposta à pressão atmosférica (mensuração da pressão relativa), ou como o diferencial de pressão entre dois pontos distintos. O referido modelo é produzido para atender a uma faixa de pressão que varia de 0 a 700 kPa, apresentando erro máximo de 2,5% dentro faixa de temperatura de trabalho. Quando alimentado por uma tensão estabilizada de 5 Vcc, emitem sinais analógicos que variam de 0,2 a 4,7 Vcc, os quais podem ser transformados em leituras de pressão pela seguinte equação:

$$P = 0,1556 \times V_s - 31,111 \quad (1)$$

Onde P é a diferença de pressão (kPa) aplicada nas entradas do transdutor, e Vs é o sinal em mV entre o terminal de referência e o de saída.

As principais características deste transdutor estão descritas na Tabela 1, e as dimensões verifica-se na Figura 10.

Figura 9 - Transdutor de pressão MPX-5700DP

Tabela 1 - Características do transdutor de pressão MPX-5700DP

Características	Símbolo	Mínimo	Típica	Máximo	Unidade
Faixa de atuação	Pop	0	-	700	kPa
Tensão de alimentação	Vs	4.75	5.0	5.25	Vcc
Corrente de alimentação	Io	-	7.0	10	mA
Tensão de saída com zero de pressão	Voff	0.088	0.2	0.313	Vcc
Tensão de saída de fundo de escala ¹	Vfso	4.587	4.7	4.813	Vcc
Tensão de saída de fundo de escala ²	Vfss	-	4.5	-	Vcc
Acurácia	-			2.5	%Vfss
Sensibilidade	V/P	-	6.4	-	mV/kPa
Tempo de Resposta	tr	-	1.0	-	ms
Tempo de aquecimento do circuito ³	-	-	20	-	ms

Fonte: Catálogo do fabricante.

1 - Vfso é definida como a tensão de saída no máximo ou pressão nominal completa;

2 - Vfss é definida como a diferença algébrica entre a tensão de saída na pressão nominal completa e a tensão de saída na pressão nominal mínimo;

3 - Tempo de aquecimento é definido como o tempo necessário para o dispositivo atender a tensão de saída especificada, após a pressão foi estabilizada.

Figura 10 - Dimensões (mm) do transdutor de pressão MPX-5700DP (Fonte, Catálogo do fabricante)

A entrada 1 do transdutor de pressão foi conectada a uma mangueira cristal com diâmetro interno de 15,9 mm (5/8") devidamente vedada e preenchida com água, para finalizar o preenchimento e evitar a formação de bolhas de ar foi utilizada uma seringa. Esta conexão foi efetuada diretamente no tampão de PVC, localizado em uma das extremidades da mangueira, para a vedação foi utilizado adesivo epóxi. A entrada 2 foi conectada a uma mangueira cristal com diâmetro interno de 3,2 mm (1/8") e comprimento de 2 m, ficando expostas a pressão atmosférica para mensuração da pressão relativa.

Para obter a pressão normal, ou seja, a pressão perpendicular ao solo em uma única direção, a mangueira cristal de 15,9 mm (5/8"), foi acondicionada entre duas calhas de aço em formato de "U" com espessura de 2 mm para evitar a deformação das mesmas durante o processo de mensuração. A instalação foi feita de forma a obter o melhor contato possível entre a calha e a mangueira, a calha inferior apresenta menor largura que a calha superior, com o intuito que exista uma folga mínima entre as calhas, a fim de permitir um deslocamento vertical livre da calha superior, ou seja, sem atrito para que não interfira na mensuração da pressão, o comprimento da calha foi dimensionado para 600 mm, conforme pode-se observar na Figura 11.

Figura 11 - Dimensões (mm) das calhas de metal, desenvolvidas para o estudo e diâmetro do tubo plástico do sensor

Para a vedação do sensor foram utilizados diversos tipos de tampões, abraçadeiras e adesivos, entretanto durante os testes em laboratório surgiam pequenos vazamentos do fluido. Para resolver esse problema, os tampões e anéis foram fabricados com material de PVC e para junção entre os tampões e a mangueira foi utilizado adesivo epóxi, o que permitiu um bom resultado durante os ensaios.

Com o objetivo de proteger o transdutor de pressão de impactos e aderência de solo durante os ensaios foram adaptadas conexões comerciais de PVC (redução de 60 x 25 mm e cap de 60 mm) na extremidade do sensor. A fim de não danificar e facilitar a remoção do sensor do solo, foi fixada uma corrente de aço com 1 metro de comprimento na calha inferior do sensor, conforme se observa na Figura 12.

Figura 12 - Proteção do transdutor de pressão

3.2 Sistema de aquisição de dados

A aquisição do sinal de saída do sensor foi feita por meio de um *datalogger* fabricado pela empresa *Campbell Scientific* modelo: CR10X, conforme se verifica na Figura 13 e suas características são apresentadas na Tabela 2.

Devido a limitação de 2,5 Vcc de tensão máxima na entrada analógica no modo *single-ended* do *datalogger*, foi utilizado um recurso eletrônico para condicionamento de sinal, um divisor de tensão feito com a associação em série de dois resistores de 10 K Ω , ou seja, uma divisão por 2 do sinal do sensor, obtendo-se uma nova faixa de tensão de entrada de 0,10 – 2,35 Vcc.

A opção por utilizar esse equipamento, foi devida sua freqüente utilização no Departamento de Engenharia de Biosistemas em diversos tipos de ensaios de máquinas e equipamentos agrícolas, onde proporciona alta confiabilidade no registro de dados, baixo consumo de bateria e flexibilidade nas instalações de diversos tipos de sensores e transdutores, outro recurso importante é a visualização em tempo real das variáveis mensuradas em um display de cristal líquido e de um teclado, que também pode ser utilizado para programação e/ou configurações em campo.

O CR10X tem 128 KB de memória *flash* (EEPROM) e 128 KB de memória (SRAM). O EEPROM *flash* armazena o sistema operacional e os programas do usuário, e a RAM é usada no armazenamento de dados e execução o programa.

O algoritmo de programação é feito em linguagem exclusiva do fabricante, utilizando-se do software PC208W, o qual possui um set de 120 instruções para desenvolver os programas de aquisição de dados. As instruções são divididas em 04 grupos: Instruções de entrada e saída, processamento, saídas de processamento e controle do programa. O intervalo de execução de cada programa pode variar de 0,0156s a 8191s, sempre com valores múltiplos de 1/64, neste caso o algoritmo foi desenvolvido para executar e salvar as mensurações com uma freqüência de 4Hz, ou seja, a cada 0,25s, o formato do arquivo gravado é do tipo de extensão .dat que podem ser importados pelo software de planilha eletrônica Microsoft Office Excel², os dados

² A indicação não significa recomendação de uso de pelo autor.

são transferidos para o computador por meio de uma comunicação serial utilizado o mesmo software de criação de algoritmos.

Figura 13 - Sistema de aquisição de dados – CR10-X

Tabela 2 – Especificações básicas do sistema de aquisição de dados (CR10-X)

Descrição	Quantidade	Faixa	Unidade
single ended	12	0 - 2500	mV
diferencial	6	± 2500	mV
pulso	2	0 - 400	kHz
I/O portas digitais	8	0 - 5	Vcc
Saídas de excitação	3	$\pm 2,5$	Vcc
Serial I/O	1	300 - 9600	baud rate
Saídas tensão	2	5	Vcc
Saídas tensão	2	12	Vcc

Fonte: Catálogo do fabricante.

3.3 Linearidade do sensor

A linearidade do sensor foi avaliada por meio de testes em um equipamento utilizado para ensaios de tração e compressão em diversos tipos de materiais, fabricado

pela Instron modelo: 4466 (Figura 14), o qual permite aplicar cargas crescentes e decrescentes de 0 a 9810 N (0 a 1000 kgf). A linearidade do sensor foi verificada aplicando cargas crescentes de 490,5 N (50 kgf) e mensurando o sinal de tensão de saída com o *datalogger* CR10X, com os dados aquisitados foram gerados os gráficos e avaliado o coeficiente de determinação por meio do software Microsoft Office Excel.

Figura 14 - Equipamento para ensaios de tração e compressão, para fins de calibragem do transdutor

3.4 Aplicação do sensor

Após os testes em laboratório o sensor foi utilizado em campo, com o objetivo de avaliar as diferentes pressões exercidas por rodados, utilizando pneus de baixa pressão e alta flutuação (BPAF) e esteiras de aço forjado instaladas sobre pneus (BPAF), ambos montados em um transbordo para cana-de-açúcar. A variação na força de tração foi mensurada de acordo com o rodado, assim como, a área de contato da esteira e do pneu de alta flutuação.

Durante os testes preliminares em campo o sensor apresentou resultados satisfatórios na avaliação das pressões exercidas ao solo, portanto optou-se no

desenvolvimento de mais 04 sensores para possíveis verificações simultâneas em diversas camadas do solo, com as mesmas especificações do primeiro sensor confeccionado.

O algoritmo de programação do sistema de aquisição de dados foi alterado para salvar as mensurações dos sensores concomitantemente, também foi adicionada ao sistema uma chave liga/desliga para o início e término da aquisição de dados.

Nos demais sensores confeccionados foram feitas as avaliações de linearidade conforme descrito no primeiro sensor.

O ensaio foi realizado na área de testes do departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP (Lat. 22° 42' 47.54" S Long. 47° 37' 41.68" O Alt .535 m) na qual o solo foi preparado por meio de subsolagem a 0,4 m de profundidade seguida de gradeação de nivelamento, com grade de discos. A cultura preexistente na área era a de milho conforme observa-se na Figura 15.

Figura 15 - Área de ensaio com preparo periódico de solo adequado para plantio de cana-de-açúcar

A esteira utilizada é fabricada pela Olosfors empresa sueca, modelo: Eco-Magnum, segundo o fabricante é feita de aço carbono manganês ligado com boro, após o processo de endurecimento, a dureza da esteira é de aproximadamente 500 Brinell, (Figura 16). Estas esteiras são amplamente empregadas na área florestal, entretanto permite a instalação em pneus de alta flutuação para fins agrícolas. Neste trabalho sua instalação foi em um transbordo de cana-de-açúcar picada com eixo tipo tandem de

rodados livres, fabricado pela Sermag³, modelo SMR 8500. Na Figura 17 apresenta-se o conjunto montado (trator + transbordo) com as esteiras metálicas instaladas nos pneus BPAF. O transbordo foi tracionado por um trator fabricado pela empresa Valtra modelo BH180, com 132,4 kW de potência e 4x2 TDA, o conjunto trator + transbordo foi cedido pela Usina de açúcar e álcool Nossa Senhora Aparecida do grupo Virgolino de Oliveira. O transbordo utilizava pneus baixa pressão e alta flutuação, marca Alliance modelo *Flotation* 328 - 500/60-22.5, com pressão de inflação de 241 kPa (35 psi), conforme o catálogo do fabricante.

Figura 16 - Esteira metálica instalada sobre os pneus BPAF

Figura 17 - Transbordo de cana-deaçúcar picada – Sermag (SMR 8500)

³ A indicação não significa recomendação de uso de pelo autor.

Na Figura 18 apresentam-se as dimensões (mm) do transbordo de cana-de-açúcar picada Sermag SMR 8500, a capacidade de carga é de 8000 kg e volume de 21 m³, a altura de carregamento é de 3,5 m e de descarregamento de 4,7 m.

Figura 18 - Dimensões (mm) do transbordo de cana-de-açúcar (Fonte, catálogo do fabricante)

Pelo fato do ensaio ter sido realizado em uma área experimental da ESALQ/USP e não ter a disponibilidade de cana-de-açúcar picada, a carga foi simulada com o preenchimento do transbordo com solo existente no local do ensaio, entretanto o transbordo foi revestido internamente com uma lona plástica, para evitar perda solo pelas áreas vazadas do mesmo durante os ensaios. Após a deposição do solo com auxílio de uma pá carregadora de rodas marca Caterpillar modelo 924F, o mesmo foi nivelado para obter uma distribuição uniforme da carga em todo o transbordo, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Carregamento do transbordo com solo

A pesagem do transbordo foi feita em duas etapas, a primeira com o transbordo sem carga, utilizou-se 04 plataformas e um indicador da marca Vesta modelo 2402A, cada plataforma suporta uma massa máxima de 4500 kg, portanto o fundo escala do equipamento é de 18000 kg com uma resolução de 2 kg. As plataformas foram instaladas em um pátio com piso de concreto nivelado, o transbordo foi posicionado sobre as plataformas. Durante a mensuração, se fez necessário o desacoplamento para evitar a transferência de peso para a barra de tração do trator, calços de madeira foram instalados no eixo tandem para evitar o tombamento do transbordo, conforme pode-se observar na Figura 20.

Figura 20 - Pesagem com balanças de plataforma do transbordo vazio

A segunda etapa da pesagem foi realizada após o preenchimento do transbordo com solo, com a finalidade de simular uma carga de cana-de-açúcar picada, para tal, o transbordo foi desacoplado do trator e içado por meio de cabos de aço por um guincho da marca Liebherr⁴ com capacidade de 100 Mg, conforme ilustra a Figura 21. O guincho possui um sistema eletrônico de pesagem integrado, dispensando a instalação de célula de carga. A pesagem foi feita por 03 repetições após a estabilização do transbordo suspenso, obtendo-se o valor médio.

Figura 21- Pesagem com guincho do transbordo carregado

Com a finalidade de isolar o peso das esteiras, do peso bruto do transbordo, as mesmas foram pesadas individualmente utilizando uma célula de carga marca Kyowa, modelo LU-5TE e capacidade de 50 kN. Para registro do valor mensurado utilizou-se o *datalogger* CR10X e o içamento da esteira foi feito por meio de um canarinho marca Karry Krane Hyster modelo K110, conforme pode-se observar na Figura 22, a pesagem também foi efetuada com 03 repetições após a estabilização da esteira suspensa, obtendo-se o valor médio.

⁴ A indicação não significa recomendação de uso de pelo autor.

Figura 22 - Pesagem com célula de carga das esteiras metálicas

3.5 Determinação da área de contato

A determinação da área de contato das esteiras metálicas e dos pneus BPAF, foi realizada com o transbordo carregado com 7505 kg de solo e devidamente nivelado, para simular uma carga típica de transbordo de cana-de-açúcar picada, observando que a capacidade máxima deste transbordo é de 8000 kg. Após o carregamento, o transbordo foi desengatado do trator, içado pelo guincho conforme descrito na determinação do peso do bruto e posicionado com cuidado sobre o solo preparado.

Posteriormente, com a finalidade de obter uma área de contato uniforme, foi polvilhado gesso em pó em toda área em torno da esteira e em todos os espaços vazios entre os rodados, conforme pode-se verificar na Figura 23. A próxima etapa foi levantar o transbordo, tomando cuidado para não danificar a depressão produzida pelo contato do rodado com solo. Após a elevação do transbordo, a área de contato foi registrada por fotografia digital em alta resolução obtida perpendicularmente ao solo, segundo é apresentado na Figura 24. As imagens resultantes foram analisadas utilizando-se o software AutoCAD 2006⁵, onde efetuou-se a correção da escala e a determinação das áreas de contato.

⁵ A indicação não significa recomendação de uso de pelo autor.

Figura 23- Condição após aplicação de gesso em pó

Figura 24 - Imagem da área de contato de uma esteira com escala referencial para análise no AutoCAD 2006

Para a determinação da área de contato dos pneus BPAF foi realizado o mesmo procedimento descrito anteriormente para esteira metálica. As Figuras 25 e 26 ilustram as imagens utilizadas no software AutoCAD 2006 para determinação das áreas de contato dos pneus do 1º e 2º eixo do transbordo respectivamente.

Figura 25 - Imagem para determinação da área de contato do pneu dianteiro

Figura 26 - Imagem para determinação da área de contato do pneu traseiro

3.6 Avaliação da pressão exercida ao solo

Para avaliar a pressão exercida no solo em diferentes profundidades e em função do tipo de rodado, foi utilizado o sensor proposto neste trabalho conforme se observa na Figura 27. A aquisição dos dados foi realizada por meio do *datalogger* modelo: CR10X fabricado pela Campbell Scientific, a frequência de coleta de dados foi

de 4 Hz. Para a aplicação da carga sobre o solo utilizou-se um transbordo de cana-de-açúcar picada carregado com solo, conforme descrito no método para a determinação da área de contato, portanto a carga aplicada utilizando o transbordo sem as esteiras metálicas foi de 15413 kg, sendo este valor a soma do transbordo vazio + a carga (7908 kg + 7505kg) e com as esteiras instaladas nos pneus BPAF, apenas acrescento-se o peso das duas esteiras (1187 kg) totalizando 16600 kg.

Figura 27 - Sensor de pressão

O ensaio foi dividido em 02 tratamentos (Pneu BPAF e Esteira Metálica) com 03 localizações distintas dos sensores no solo, (Horizontal, Vertical e Diagonal), para a condição dos sensores dispostos na horizontal, foram utilizado 04 sensores e realizadas 03 passadas sucessivas do transbordo carregado sobre os mesmos, para as demais condições foram 03 sensores e 04 passadas, totalizando 36 determinações.

Na disposição horizontal, os 04 sensores foram instalados perpendicularmente ao sentido do tráfego a uma profundidade de 0,15 m, espaçados 0,5 m (Figura 28), desta forma obteve-se 4 repetições por passada.

Para instalação dos sensores nos arranjos vertical e diagonal, foi necessário abrir uma trincheira com o auxílio de uma retro escavadora (Massey Ferguson, modelo MF86 HS⁶), com as seguintes dimensões: 2 m de comprimento, 1,5 m de largura e 1 m de profundidade. Os sensores foram inseridos em furos, feitos com um trado com o diâmetro muito próximo do diâmetro do sensor, de forma a possibilitar o maior contato possível do solo com o sensor. Os sensores foram posicionados perpendicularmente ao sentido do tráfego e paralelo a superfície do solo nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m, entretanto nos testes preliminares foi observada uma baixa sensibilidade do

⁶ A indicação não significa recomendação de uso de pelo autor.

sensor na profundidade de 0,40 m e optou-se por eliminar esta profundidade do ensaio. As Figuras 29 e 30 ilustram respectivamente o arranjo dos sensores instalados na vertical e na diagonal.

Foram avaliadas somente a pressões exercidas pelos rodados do 1º e 2º eixo tandem (dianteiro e traseiro) do lado esquerdo do transbordo, seguindo a mesma metodologia para todos os arranjos propostos. A velocidade de deslocamento do transbordo nos tratamentos foi realizada em torno de $0,56 \text{ m.s}^{-1}$. Em todos os arranjos foram coletadas amostras de solo com latas de alumínio devidamente vedadas nas três camadas citadas para determinações de granulometria e umidade.

Figura 28 - Sensores dispostos na horizontal, antes do cobrimento com solo

Figura 29 - Trincheira aberta e sensores dispostos na vertical

Figura 30 - Trincheira aberta e sensores dispostos na diagonal

Durante os ensaios a pressão exercida pelos pneus do trator, não influenciaram na avaliação da pressão exercida pelos rodados do transbordo, pelo fato da bitola do eixo traseiro do trator ser menor que a bitola do transbordo, não sobrepondo o rastro do trator e também pelo comprimento de atuação do sensor ser de 0,6 m.

3.7 Mensuração da Força de Tração

Para determinar a força de tração exercida pelos conjuntos trator + transbordo, com pneu BPAF e com esteiras metálicas, foram realizados 6 ensaios com 4 repetições cada um em terreno plano, com dois tipos cobertura: grama e solo; também com duas condições no transbordo: carregado com 7500 kg e vazio, conforme ilustram as Figuras 31 e 32. Para mensurar a força requerida na barra de tração utilizou-se uma célula de carga de 50 kN (marca: Kyowa modelo: LU-5te), fixada uma extremidade na barra de tração do trator MF 7150 o qual tracionava o conjunto trator + transbordo interligada por meio de um cabo de aço (disposto paralelamente ao solo), entre a outra extremidade da célula de carga e a barra tração do trator Valtra BH180⁷. Todavia, para se obter a força exercida somente pelo transbordo, foi necessário subtrair da força do conjunto a força de atrito de rolamento do trator acoplado ao transbordo, portanto, efetuou-se o mesmo

⁷ A indicação não significa recomendação de uso de pelo autor.

procedimento apenas tracionando a fonte de potência (Figura 33). A diferença entre as duas determinações forneceu apenas a força de tração exercida pelo transbordo, nas duas condições de rodados estudadas. Os tiros foram feitos em velocidade em torno de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$, a força média foi calculada pela seguinte equação:

$$F_m = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{t_p} \quad (2)$$

Em que:

F_m = força de tração média (kN);

F_i = força de tração instantânea (kN.s^{-1});

t_p = tempo de percurso (s).

A aquisição dos dados foi feita com o *datalogger* CR10X a uma frequência de aquisição de 1 Hz, para tanto foi desenvolvido um novo algoritmo para o registro dos valores em kN, os dados gerados no formato .dat, foram importados e analisados com auxílio do software Microsoft Office Excel.

Figura 31 - Ensaio de tração do conjunto fonte de potência + transbordo

Figura 32 - Ensaio de tração do conjunto fonte de potência + transbordo sobre solo compactado

Figura 33 - Determinação da força de atrito de rolamento da fonte de potência

3.8 Mensuração do índice de cone (IC)

A mensuração do índice de cone (IC) foi realizada por meio de um penetrógrafo hidráulico-eletrônico (SILVA JÚNIOR et al., 2000), que determina a resistência à penetração. O equipamento é constituído por um cilindro hidráulico, uma haste conectada a uma célula de carga com capacidade máxima de 5 kN e um sensor potenciométrico linear para determinar a profundidade do cone no solo. Estes são conectados a um computador portátil, por meio de uma interface eletrônica composta de um conversor analógico digital de 8 bits de resolução e um amplificador operacional

dedicado a instrumentação eletrônica. Os dados são enviados ao computador pela porta paralela, um software desenvolvido ambiente Borland Delphi⁸ traça em tempo real um gráfico para visualização e conferência da força exercida ao solo pela ponta cônica. O índice de cone (IC) é determinado pela Equação 3 :

$$IC(MPa) = \frac{Força(Kgf) \times 9.81}{Área_cone(m^2) \times 10^6} \quad (3)$$

A taxa de aquisição dos dados é realizada em 10Hz, o cone e a velocidade de penetração do cone no solo, obedecem as características estruturais e operacionais definidas pelas normas ASAE S313.3 (1999) e ASAE EP542 (1999) respectivamente. Este equipamento foi acoplado a um trator Massey Ferguson 5283 (Figura 34) o qual acionava o cilindro hidráulico pelo controle remoto (sistema hidráulico) do mesmo.

Os arquivos de dados gerados para cada ponto amostrado, foram gravados no formato .txt, os mesmos foram tratados por uma macro desenvolvida no Microsoft[®] Excel, a qual calcula uma média para cada intervalo de dados de 0,10 m de profundidade.

Figura 34 - Obtenção do índice de cone ao lado das trincheiras e sensores

⁸ A indicação não significa recomendação de uso de pelo autor.

Os pontos de IC, foram obtidos com 04 determinações realizadas no intervalo de cada passada do transbordo sobre os sensores, como cada tratamento foram feitas 04 passadas totalizando 16 mensurações de IC por tratamento.

3.9 Determinação da força para deslocar a esteira em suspensão

Esta avaliação foi realizada para determinar a força necessária para retirar a esteira do estado em repouso, ou seja, estacionada. Para tanto, o transbordo montado com a esteira foi levantado apenas de um lado, por meio de um macaco hidráulico jacaré com capacidade de 100 kN. Com uma célula de carga fixada em pontos diferentes na esteira e mantida o mais paralelo possível ao solo, mensurou-se o pico de força necessário para movimentar a esteira suspensa no ar, eliminando-se a componente força de atrito com solo e obtendo-se assim, apenas o atrito da esteira com os pneus conforme observa-se na Figura 35.

Figura 35 - Determinação da força de deslocamento com esteira suspensa

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Umidade e Granulometria

As Tabelas 3 a 5 apresentam os valores médios de umidade e granulometria do solo, com seus respectivos desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (C.V.). A umidade do solo em todos os tratamentos e profundidades estudadas apresentou valores médios entre 18,2 a 21,7%, os C.V. máximo determinados para umidade e granulometria foram de 15,67% e 22,28%.

De acordo com Shimakura (2008), o C.V. é um número adimensional, comparável mesmo em casos de unidades diferentes e interpreta a variabilidade dos dados em relação à média (quanto menor, mais homogêneo é o conjunto de dados). Pimentel-Gomes (2002) descreve que em trabalhos de campo valores de CV acima de 30% são considerados muito altos. Deste modo, considerou-se haver boa estabilidade do teor de água e granulometria no perfil, não se esperando, portanto, interferência diferenciada nas determinações realizadas durante o estudo.

Tabela 3 - Dados de umidade e granulometria a 0,1 m

Tratamentos	Umidade (%)	Granulometria (%)		
		Argila	Silte	Areia
Pneu Diagonal	21,06	35,23	17,89	46,88
Pneu Vertical	19,10	33,23	16,89	49,88
Esteira Diagonal	17,73	32,30	15,13	52,56
Esteira Vertical	20,10	35,90	15,74	48,36
Média	19,50	34,17	16,41	49,42
DP	1,42	1,68	1,23	2,43
C.V. %	7,29	4,93	7,47	4,91

Tabela 4 - Dados de umidade e granulometria a 0,2 m

Tratamentos	Umidade (%)	Granulometria (%)		
		Argila	Silte	Areia
Pneu Diagonal	20,83	41,79	15,37	42,83
Pneu Vertical	17,27	28,96	14,72	56,31
Esteira Diagonal	14,81	25,03	14,79	60,17
Esteira Vertical	19,79	33,87	16,00	50,12
Média	18,18	32,41	15,22	52,36
DP	2,70	7,22	0,60	7,58
C.V. %	14,84	22,28	3,92	14,48

Tabela 5 - Dados de umidade e granulometria a 0,3 m

Tratamentos	Umidade (%)	Granulometria (%)		
		Argila	Silte	Areia
Pneu Diagonal	24,89	41,05	15,79	43,15
Pneu Vertical	17,56	28,31	15,73	55,96
Esteira Diagonal	20,31	41,08	13,85	45,06
Esteira Vertical	24,04	48,00	10,77	41,22
Média	21,70	39,61	14,04	46,35
DP	3,40	8,21	2,36	6,60
C.V. %	15,67	20,73	16,78	14,23

4.2 Área de contato com o solo.

Partindo do princípio que a pressão exercida no solo está diretamente ligada com a relação $\frac{\text{Força}}{\text{Área}}$, e que um dos objetos de estudo deste trabalho foi a área de contato, a variável força foi mantida constante, pois, como descrito no item 3.5, aplicou-se a mesma carga durante todo o ensaio. Na Figura 36, pode-se observar a determinação da área de contato da esteira, bem como os valores de cada subárea (Tabela 6), calculada a partir por meio do software AutoCAD 2006.

Figura 36 - Determinação da área de contato da esteira por meio do software AutoCAD 2006

Tabela 6 - Soma das áreas de contato de uma esteira

Subáreas	Área de contato (m ²)
1	0,3757
2	0,0685
3	0,0490
4	0,0590
5	0,3466
Total	0,8988

Para mensuração da área de contato dos pneus foi utilizada a mesma metodologia. Portanto, nas Figuras 37 e 38, podem-se observar as áreas de contato dos pneus dos eixos dianteiro e traseiro, correspondentes a um lado transbordo, também determinadas por meio do AutoCAD 2006.

Figura 37 - Determinação da área de contato do pneu do 1º eixo (dianteiro)

Figura 38 - Determinação da área de contato do pneu do 2º eixo (traseiro)

Na Tabela 7, calculou-se a área de contato total dos pneus, ou seja, área de contato do pneu do 1º eixo + do 2º eixo, cuja soma é igual a $0,3936 \text{ m}^2$, entretanto observou-se que área de contato do pneu do 1º eixo (dianteiro) foi 20% maior que a do 2º eixo (traseiro), possivelmente, isto é devido a localização longitudinal dos eixos do transbordo, proporcionando uma transferência de peso para a barra de tração.

Tabela 7 - Soma das áreas de contato de dois pneus

Eixos	Área de contato (m^2)
Dianteiro	0,2154
Traseiro	0,1782
Total	0,3936

Pelos dados apresentados nas Tabelas 6 e 7, observou-se que a área de contato da esteira é 128% maior do que a área de contato do pneu (Figura 39), portanto teoricamente a pressão exercida ao solo pelo sistema utilizando esteira metálica é inferior ao conjunto montado com pneus de alta flutuação.

Figura 39 - Gráfico das áreas de contato total de dois pneus e de uma esteira

Com base na Figura 39, que apresenta as áreas de contato efetivamente determinadas do lado esquerdo do transbordo, pode-se inferir admitindo-se a simetria em ambos os lados, que a área de contato total do transbordo é dobro dos valores apresentados nesta figura. Com os valores das áreas de contato total e o peso bruto do transbordo carregado foram calculadas as pressões superficiais exercidas pelos conjuntos montados com esteiras metálicas e pneus BPAF, sendo 90,56 kPa a pressão exercida pelas esteiras e 192,01 kPa pelos pneus BPAF, portanto nestas condições de carga no transbordo, utilizando as esteiras metálicas exerce uma pressão superficial calculada de 47% menor quando comparado com os pneus BPAF (Figura 40).

Figura 40 - Pressão superficial exercida pelos sistemas de esteira e pneu

4.3 Linearidade do sensor

As determinações das pressões exercidas no solo foram calculadas, por meio da equação (linear) de calibração do transdutor (MPX - 5700DP) fornecida pelo fabricante. Além disso, foram avaliadas a linearidades dos sensores após a construção, para verificar possíveis alterações na característica linear do transdutor, devido as conexões e adequações efetuadas durante o desenvolvimento do sensor, conforme descrito no item 3.1.

Os coeficientes de determinação expressos nas Figuras 41 a 44 indicam que a linearidade do transdutor foi mantida, mesmo após a construção do sensor.

Figura 41 - Gráfico de linearidade sensor 1

Figura 42 - Gráfico de linearidade sensor 2

Figura 43 - Gráfico de linearidade sensor 3

Figura 44 - Gráfico de linearidade sensor 4

4.4 Pressão exercida ao solo

A primeira determinação realizada foi com os sensores de pressão dispostos na horizontal a uma profundidade de 0,15 m, nas Figuras 45 e 46 estão ilustrados os gráficos desta condição, para os ensaios realizados com pneu de alta flutuação e esteira metálica respectivamente.

Após a passagem do transbordo sobre o sensor, o valor máximo observado para cada eixo, pode ser definido como pico de pressão, relacionados diretamente aos eixos dianteiro e traseiro. As diferenças dos patamares de pressão remanescentes de cada

passada indicam as pressões residuais no solo e conforme Turner et al. (2001) estão diretamente ligadas aos picos de pressões, podendo ser um indicador de compactabilidade do solo.

Figura 45 - Pressão exercida no solo, utilizando pneu BPAF e sensores dispostos na horizontal

Figura 46 - Pressão exercida no solo, utilizando esteiras metálicas e sensores dispostos na horizontal

Conforme observado nas Figuras 45 e 46, a média dos picos de pressão exercida no solo na profundidade de 0,15 m pelo sistema com esteiras metálicas foi 50% menor do que sistema utilizando os pneus BPAF, tal valor foi próximo do calculado no item 4.2 (47%) referente à pressão superficial exercida pelas esteiras metálicas, comparadas com os pneus.

Os picos de pressão no tratamento com pneus, apresentaram valores entre 111 a 222 kPa no decorrer das 03 passadas do transbordo, valores semelhantes a estes são descritos por Cavalieri et al. (2009) na camada de 0 a 0,10 m em quatro

tratamentos utilizando trator e semeadora como fonte de carga, encontrando valores de 124 a 247 kPa.

Nas Figuras 47 e 48 são mostrados os resultados do ensaio de pressão exercida no solo, com os sensores dispostos na vertical. No tratamento com pneus na camada de 0,1 m observou-se, que os valores são inferiores aos obtidos (mesmo tratamento com pneus), com sensores dispostos na horizontal, este fato pode ter ocorrido devido à metodologia de instalação dos sensores no solo (item 3.6), pois, os sensores dispostos na vertical, foram instalados no solo por meio de orifícios utilizando um trado e os sensores dispostos na horizontal, foram cobertos com uma camada de 0,15 de solo.

Figura 47 - Pressão exercida no solo, utilizando pneu BPAF e sensores dispostos na vertical

Figura 48 - Pressão exercida no solo, utilizando esteira metálica e sensores dispostos na vertical

Nesta mesma condição observa-se que, na camada de 0,1 m de profundidade não houve grandes diferenças entre os tratamentos, pois a média calculada foi de 108,7 e 105,5 kPa utilizando pneu e esteira, respectivamente. Porém, nas camadas de 0,2 e 0,3 m as pressões exercidas pela esteira foram praticamente nulas, enquanto que o conjunto utilizando os pneus de alta flutuação, apresentou valores de picos de pressão entre 30 e 60 kPa.

As Figuras 49 e 50 mostram os resultados dos ensaios de pressão realizados com os sensores dispostos na diagonal nas camadas de 0,1; 0,2 e 0,3 m de profundidade.

Figura 49 - Pressão exercida no solo, utilizando pneus BPAF e sensores dispostos na diagonal

Figura 50 - Pressão exercida no solo, utilizando esteira metálica e sensores dispostos na diagonal

Nesta condição foi observado na camada de 0,1 m de profundidade, pressões maiores do sistema com pneu em relação ao sistema de esteira, onde, os picos de pressão máxima foram 122,1 e 61,9 kPa respectivamente, posto de outra forma em torno de 50% menor utilizando as esteiras, mesma observação é válida nas camadas de 0,2 e ,3 m. Dados semelhantes foram encontrados por Turner et al. (2001) utilizando um sensor (AgTech) e um trator com peso de 13 Mg, encontrando pico de pressão de 117 kPa e Arvidsson e Keller (2007), aplicando cargas de 11, 15 e 33 kN, com pressão de inflação dos pneus de 70, 100 e 150 kPa determinou pressões entre 99 e 214 kPa, utilizando células de carga, ambos estudos a uma profundidade de 0,10 m.

O arranjo com os sensores dispostos na diagonal foi o que melhor determinou a pressões nas camadas estudadas, entretanto, no arranjo com os sensores na vertical pode ter ocorrido interferência na mensuração, pelo fato de um sensor estar sobreposto ao outro.

Com base nos gráficos 51 a 53, verificou-se que os sensores foram capazes de determinar os picos de pressão tanto do 1º eixo (dianteiro) quanto no 2º eixo (traseiro), para os dois tratamentos e nas 03 profundidades estudadas. Observou-se também, alteração nos picos de pressão de acordo o tipo de rodado utilizado, sendo que no tratamento com esteira os valores foram inferiores, quando comparados com pneu, para todas as camadas estudadas.

A relação picos de pressão e profundidade do solo foi inversamente proporcional, ou seja, em camadas mais profundas os valores de pico de pressão foram inferiores para os dois tratamentos estudados.

No conjunto utilizando pneu BPAF e na camada de 0,1 m, não apresentou acréscimo nas pressões de picos com incremento das passadas, porém nas camadas de 0,2 e 0,3 m observou-se um acréscimo nos picos de pressão da 1ª para a 2ª, com tendência de estabilização dos picos, para as demais passadas. fato repetido nas 03 profundidades.

Figura 51 - Picos de pressões exercidas a 0,1 m no perfil do solo, com os sensores na diagonal

Figura 52 - Picos de pressões exercidas a 0,2 m no perfil do solo, com os sensores na diagonal.

Figura 53 - Picos de pressões exercidas a 0,3 m no perfil do solo, com os sensores na diagonal

Por sua vez, as Figuras 54 a 56 apresentam os patamares de pressão residual ocorridos após a passagem dos rodados, ou seja, observaram-se modificações no recalque dos perfis. Esses recalques foram maiores, para o tratamento utilizando pneus se comparado com o tratamento utilizando esteira, em todos os perfis.

Outra observação foi o aumento expressivo da pressão residual, após a primeira passada do transbordo no sistema utilizando pneus BPAF e a tendência de estabilização da pressão residual nas passadas subseqüentes. Porém, utilizando esteira metálica às pressões residuais tendem a aumentar a cada passada do transbordo. Esse fato ocorreu provavelmente, devido o solo não ter atingido os patamares saturação de pressão residual encontrados no conjunto utilizando pneus.

Figura 54 - Pressão residual média após as passagens dos rodados na profundidade de 0,1m

Figura 55 - Pressão residual média após as passagens dos rodados, na profundidade de 0,2 m

Figura 56 - Pressão residual média após as passagens dos rodados, na profundidade de 0,3 m

4.5 Força de tração

Os resultados obtidos permitem observar (Tabela 8), um aumento médio de 137% da força requerida na barra de tração, confrontando os valores do conjunto utilizando esteiras metálicas, com pneus de alta flutuação na condição solo agrícola com carga (SAC). Esta diferença encontrada foi possivelmente, devido à tensão da esteira com o atrito de deslizamento da mesma sobre os pneus BPAF, dificultando o deslocamento sobre o terreno.

Valores consideráveis, encontrados a partir da elevação do transbordo (com a esteira metálica instalada sobre os pneus) e a determinação da força necessária para deslocar o conjunto esteira + pneus (movimento de rotação das rodas), pode ser uma explicação provável (ver item 4.6).

Tabela 8 - Dados ensaio de tração com pneu e esteira

	PNEU			ESTEIRA		
	SAC	SAV	SCV	SAC	SAV	SCV
Força média (N)	8088,3	2575,3	1782,7	19180,6	8254,7	7556,1
DP	61,58	69,91	24,29	116,28	172,63	23,00
C.V. %	7,47	26,62	13,36	5,95	20,51	2,98

SAC = em solo agrícola com carga; SAV = solo agrícola sem carga (vazio) e SCV = solo compactado sem carga (vazio)

Na Tabela 8 observa-se, ainda, que ocorreram diferentes exigências tratórias entre a condição solo agrícola sem carga (SAV) para ambos os tipos de rodados, onde a esteira exigiu muito mais força de tração. O mesmo é válido para a condição solo compactado sem carga (SCV), portanto, mesmo sem carga no transbordo, em solo agrícola ou compactado, o conjunto com esteira exige uma maior força na barra de tração para deslocar o transbordo, comparando-se com conjunto de pneus.

4.6 Força de deslocamento da esteira em suspensão

Determinou-se, ainda, a força necessária para retirar o conjunto esteira + pneus do estado de repouso (Figura 57), com isso obteve-se a força de atrito necessária para vencer a inércia do conjunto esteira + pneus. A força média mensurada foi de 1,9 kN (Tabela 9), comprovando que a instalação da esteira metálica, provoca atrito no pneu, dificultando o deslocamento sobre o terreno. No entanto, este atrito é necessário para evitar o patinamento entre os pneus e a esteira.

Tabela 9 - Força de deslocamento com a esteira em suspensão

	Posições		
	1	2	3
Força média (N)	1668,8	2023,8	1971,4
DP	8,54	16,82	13,60
C.V. %	5,02	8,15	6,77

Figura 57 - Força de deslocamento da esteira em suspensão

4.7 Índice de cone

O índice de cone (IC) foi obtido conforme descrito no item 3.8. A Figura 58 apresenta os gráficos de IC dos ensaios com os sensores dispostos na horizontal, com valores médios de 4 repetições de cada passada. Os resultados obtidos nesta condição apresentaram aleatoriedade entre as passadas e camadas estudadas, não sendo possível interpretar o fenômeno ocorrido.

Figura 58 - IC esteira e pneu com sensores na horizontal

Figura 59 - IC esteira e pneu com sensores na vertical

Figura 60 - IC esteira e pneu com sensores na diagonal

Os valores máximos de IC (Figuras 59 e 60) foram observados na camada de 0 a 0,1 m, com valores de 3,6 e 4,8 MPa para os pneus BPAF e esteira metálica, respectivamente. Nas camadas mais inferiores o IC ficou em torno de 2 MPa. Esses valores encontrados têm sido associados a condições impeditivas para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (SILVA et al., 2002). Entretanto, Camargo e Alleoni (1997) admitem que quando a resistência à penetração é menor do que 1,1 MPa não há limitação ao crescimento radicular, sendo o solo considerado como muito baixa resistência, enquanto que para valores entre 1,0 e 2,5 MPa, a resistência deve ser considerada baixa, ocorrendo pouca limitação ao crescimento radicular.

De uma forma geral, os resultados do IC foram superiores no tratamento com esteiras, quando comparados com os pneus. Essa ocorrência contraria os resultados obtidos nos estudos de pressão exercida no solo (item 4.4), onde o tratamento com pneu apresentou picos de pressão e pressões residuais superiores aos valores encontrados nos tratamentos com esteira, em todas as condições de estudo.

Uma possível explicação de tal incoerência é o fato de IC ser uma determinação estática, pontual no solo e apresentar uma alta variabilidade entre as repetições, enquanto que a pressão é uma determinação dinâmica. Tal variabilidade foi encontrada por Domsch et al. (2006) com determinações de IC utilizando 04 hastes simultâneas, apresentando baixo coeficientes de correlação (0,27 e 0,58) e por Oliveira et al. (2008), com 03 mensurações de IC na fileira e entrefileira, não apresentando diferenças significativas quando analisadas separadamente, porém os coeficientes de variação foram elevados (41 a 58%).

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste estudo conclui-se que:

1. O sensor desenvolvido foi capaz de avaliar as pressões exercidas ao solo decorrentes do tráfego de máquinas sobre o solo agrícola;
2. O sensor permitiu determinar os picos e as pressões residuais a cada passagem de rodados até profundidade de 0.3 m;
3. Confirmou-se a hipótese do trabalho de que as esteiras metálicas exercem menor pressão ao solo comparado com os pneus BPAF;
4. Pode-se considerar o uso da esteira metálica em transbordo de cana-de-açúcar para redução da pressão exercida nas camadas estudadas e conseqüentemente o decréscimo da compactação;
5. A utilização de esteiras metálicas apresentou significativa elevação da força requerida na barra tração quando comparada com os pneus BPAF.

REFERÊNCIAS

ABU-HAMDEH, N.H.; AL-WIDYAN, M.I. Effect of axle load, tire inflation pressure, and tillage system on soil physical properties and crop yield of a Jordanian soil.

Transactions of the Asae, St. Joseph, v. 43, n. 1, p. 13-21, 2000.

ALADAWI, S.S.; REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. **Transactions of the Asae**, St. Joseph, v. 39, n. 5, p. 1641-1649, 1996.

ARAUJO, A.G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, p. 284-291, 2007.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **ASAE EP542: Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer**. In: ASAE Standards. St. Joseph, 1999. p. 996-999.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **ASAE S313.3: Soil Cone Penetrometer**. In: ASAE Standards. St. Joseph, 1999. p. 847-848.

BRAGA, N.C. Sensores de pressão: como usar?. **Mecatrônica Fácil**, São Paulo, v. 6, n. 36, set/out, 2007.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1997. 132p.

CANILLAS, E.C.; SALOKHE, V M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, 2002.

CARRIER, D.; TESSIER, S.; CHI, L.; MCLAUGHLIN, N.B. **Soil Ground Pressure Distribution Device**. Saskatoon-SK.: CSAE, 1995. p. 1-9. (CSAE Paper, 95-401).

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; ARVIDSSON, J.; TORMENA, C.A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um cambissolo háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 477-485, jun. 2009.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 161-174, 2003.

DEGIRMENCIOGLU, A.; WILKINSON, R.H.; SRIVASTAVA, A.K.; WOLFF, T.H.; WAY, T.R. 1997. **Effects of dynamic load, inflation pressure and slip on soil-tire interface pressures**. St. Joseph, MI: ASAE, 1997. (ASAE Paper No. 97-1024).

DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, A.R.; FONSECA, S.; LEITE, F.P. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5 p. 805-810, out. 2004.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, p. 139-151, 1995.

DOMSCH, H.; EHLERT, D.; GIEBEL, A.; WITZKE, K.; BOESS, J. Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 7, n. 5, p. 309-326, 2006.

GYSI, M.; MAEDER, V.; WEISSKOPF, P. Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. **Transactions of the Asae**, St. Joseph, v. 44, n. 6, p. 1385-1389, 2001.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors Influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 239-282, 1988.

HAKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 85-97, 1995.

HARRIS, H.D.; BAKKER, D.M. A soil stress transducer for measuring in situ soil stresses. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 35-48, 1994.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69 (Developments in Agricultural Engineering, 11)

HORN, R. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 23-36, 1995.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 89-99, 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-24, 2004.

KAYOMBO, B.; LAL, R. Responses of tropical crops to soil compaction. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 287-316. (Developments in Agricultural Engineering,11).

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 191-205, 2004.

KIRBY, J.M. Soil stress measurement.. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 73, n. 2, p. 141-149, 1999. Pt.2 - Transducer beneath a circular loaded area.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função a umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.211-218, 1999.

KOOISTRA, M.J.; TOVEY, N.K. Effects of compaction on soil microstructure. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.91-111. (Developments in Agricultural Engineering,11).

LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. Theoretical evaluation on the feasibility of controlled traffic farming (CTF) using wide-span implements carriers (WSIC) for Canadian agriculture. In: ANUAL MEETING OF THE CSAE/SCGR, 2003, Montréal, **Proceedings...** Montreal: CSAE/SCGR, 2003, Paper no.03-233.

LANÇAS, K.P. **Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas**. 1996. 172p. Tese (Livre Docência em Mecânica Aplicada/Engenharia Rural) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Julio Mesquita Filho", Botucatu, 1996.

LANÇAS, K.P. Diagnóstico e controle localizado da compactação do solo. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DO AGRONEGÓCIO DO ALGODÃO / SEMINÁRIO ESTADUAL DA CULTURA DO ALGODÃO, 5. 2000, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, 2000. p. 25-32.

LANÇAS, K.P. Mobilização do solo sem muita agressão. Subsolagem ou escarificação. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v. 2, n. 4, p. 38-41, 2002.

LARSON, W.E.; EYNARD, A.; HADAS, A.; LIPIEC, J. Control and avoidance of soil compaction in practice. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.597-625. (Developments in Agricultural Engineering, 11).

LEBERT, M.; HORN, R. A METHOD TO PREDICT THE MECHANICAL STRENGTH OF AGRICULTURAL SOILS. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 275-286, 1991.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1149-1159, 2003.

OLIVEIRA, A.S.; COELHO, M.F.; FAULIN, M.S.A.R.; SALVI, J.V.; MOLIN, J.P. Variabilidade espacial da compactação do solo nas linhas de cultivo e de tráfego em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3. 2008. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. p. 382-392.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESK, D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.2, p.291-299, 2003.

OSULLIVAN, M.F.; DICKSON, J.W.; CAMPBELL, D.J. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. **European Journal of Soil Science**, West Sussex, v. 38, n. 1, p. 137-148, 1987.

PAZOS, F. Automação de Sistemas & Robótica. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil, , 2002. v. 1 p. 133-134.

PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. p. 21-22.

PYTKA, J. Design considerations and calibration of stress transducers for soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 46, n. 5, p. 241-249, 2009.

RAPER, R.L.; KIRBY, J.M. Soil compaction: How to do it, undo it, or avoid doing it. In: AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2006, Louisville, Kentucky. **ASABE Distinguished Lecture Series**. St. Joseph, n. 30, p. 1-14, 2006.

RIPOLI, T.C.C.; MOLNA JR, W.F.; RIPOLI, M.L.C. **Manual prático do agricultor - máquinas agrícolas**. Piracicaba: Edição dos autores / Degaspari serviços gráficos, 2005. v. 1. 192 p.

RUCKNAGEL, J.; HOFMANN, B.; PAUL, R.; CHRISTEN, O.; HULSBERGEN, K.J. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1/2, p. 213-220, 2007.

SHIMAKURA, S.E. **Conceitos fundamentais e princípios básicos de bioestatística**. disponível em:< <http://www.leg.ufpr.br/~silvia/CE055/node26.html>> Acesso em: 18 maio 2010.

SILVA JUNIOR, R.L. ; MOLIN, J.P. ; AMARAL, J.R. Caracterização de um penetrômetro hidráulico montado em trator com instrumentação eletrônica para aquisição de dados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza. **Anais...** Jaboticabal : SBEA, 2000. 1 CD-ROM.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo** sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p.1-18.

SMITH, B.E.; BURCHAM, T.N.; TO, F.S.; VANDEVENDER, K. W.; MATTHES, R.K. Mobile soil-tire interface measurement system. **Transactions of the Asae**, Amsterdam, v. 37, n. 5, p. 1633-1637, 1994.

SMITH, D.L.O.; DICKSON, J.W. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 46, n. 1, p. 13-29, 1990.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soil as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 1, p. 15-24, 1995.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, maio/jun. 2004.

TORMENA, C.A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.333-339, 1996.

TRAUTNER, A.; ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 107-118, 2003.

TURNER, R.J.; RAPER, R.L. **Soil stress residuals as predictors of soil compaction**. St. Joseph, Mich.: ASAE. 2001. (ASAE Paper, 011063).

VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARVIDSSON, J.; HORN, R. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 1-8, 2003.

WOOD, R.K.; REEDER, R.C.; MORGAN, M.T.; HOLMES, R. G. Soil physical-properties as affected by grain cart traffic. **Transactions of the Asae**, St. Joseph, v. 36, n. 1, p. 11-15, 1993.