



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

JOSÉ DENILSON DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO UTILIZANDO MÁQUINAS DE
COLHEITA SEMI MECANIZADA**

**RECIFE -PE
JULHO DE 2023**

**AVALIAÇÃO DA ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO UTILIZANDO MÁQUINAS
COLHEITA SEMI MECANIZADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Dr. Mario Monteiro Rolim

Co-Orientador: Dr. Renato Paiva de Lima

**RECIFE – PE
JULHO DE 2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586a

Silva, José Denilson

AVALIAÇÃO DA ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO UTILIZANDO MÁQUINAS DE COLHEITA SEMI
MECANIZADA: Engenharia Agrícola / José Denilson Silva. - 2023.
36 f. : il.

Orientador: Mario Monteiro Rolim.
Coorientador: Renato Paiva de Lima.
Inclui referências e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2023.

1. Compactação do solo. 2. pressão de insulflagem. 3. máquinas. 4. interação pneu - solo. I. Rolim, Mario Monteiro, orient. II. Lima, Renato Paiva de, coorient. III. Título

CDD 630



Universidade Federal Rural de Pernambuco
**COORDENAÇÃO PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA-
PRPG**

ATA Nº 38

Aos vinte e sete dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte três, às 14h, na Plataforma Google Meet, instalou-se a banca examinadora de dissertação de mestrado do aluno José Denilson da Silva. A banca examinadora foi composta pelos professores Dr. Maurício Javier de León, UFPB, examinador externo, Juliana Pinheiro Dadalto, UFRPE, examinadora externa, Renato Paiva de Lima, USP, examinador externo e Mário Monteiro Rolim, UFRPE, orientador. Deu-se início a abertura dos trabalhos, por parte do professor Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, coordenador do programa, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, passou a presidência dos trabalhos ao professor Mário Monteiro Rolim, que de imediato solicitou ao candidato que iniciasse a apresentação da dissertação, intitulada AVALIAÇÃO DA ÁREA DE CONTATO PNEUSOLO EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS, marcando um tempo de 40 minutos para a apresentação. Concluída a exposição, o prof. Mário Monteiro Rolim, presidente, passou a palavra ao examinador externo, Maurício Javier de León, para arguir o candidato, e, em seguida, a examinadora externa, Juliana Pinheiro Dadalto e em seguida ao Dr. Renato Paiva de Lima, examinador externo, para que fizessem o mesmo; após feitas as considerações sobre o trabalho em julgamento; tendo sido aprovado o candidato, conforme as normas vigentes na Universidade Federal Rural de Pernambuco. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, no prazo de 60 dias; contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Conforme o Artigo 46 (§ 1º da Resolução 342/2019 - CEPE ou § 2º da Resolução 238/2021 - CEPE) , o(a) candidato(a) não terá o título se não cumprir as exigências acima.

Dr. MAURICIO JAVIER DE LEÓN, UFPB

Examinador Externo à Instituição

Dr. RENATO PAIVA DE LIMA, USP

Examinador Externo à Instituição

Dra. JULIANA PINHEIRO DADALTO, UFRPE

Examinadora Externa ao Programa

Dr. MARIO MONTEIRO ROLIM, UFRPE

Presidente

JOSÉ DENILSON DA SILVA

Mestrando



Universidade Federal Rural de Pernambuco
**COORDENAÇÃO PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA-
PRPG**

FOLHA DE CORREÇÕES

ATA Nº 38

Autor: JOSÉ DENILSON DA SILVA

Título: AVALIAÇÃO DA ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Banca examinadora:

Prof. MAURICIO JAVIER DE LEÓN	Examinador Externo à Instituição	_____
Prof. RENATO PAIVA DE LIMA	Examinador Externo à Instituição	_____
Prof. JULIANA PINHEIRO DADALTO	Examinadora Externa ao Programa	_____
Prof. MARIO MONTEIRO ROLIM	Presidente	_____

Os itens abaixo deverão ser modificados, conforme sugestão da banca

1. [] INTRODUÇÃO

2. [] REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3. [] METODOLOGIA

4. [] RESULTADOS OBTIDOS

5. [] CONCLUSÕES

COMENTÁRIOS GERAIS:

Declaro, para fins de homologação, que as modificações, sugeridas pela banca examinadora, acima mencionada, foram cumpridas integralmente.

Prof. MARIO MONTEIRO ROLIM

Orientador(a)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a graça de viver e me conduzir a uma grande conquista, e por ser meu refúgio nos momentos mais difíceis da vida.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI) pela oportunidade de cursar o mestrado acadêmico.

A minha família pelo apoio durante toda minha vida e principalmente nesse momento tão importante, em especial a, minha mãe Diene e meu irmão Diego. Sem o suporte deles nada disso seria possível.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim, pelas conversas, incentivo e contribuições para meu desenvolvimento e do trabalho. Ao Dr. Renato Paiva de Lima pelas sugestões e contribuições. Desde já, meu muito obrigado.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica dos Solos e Aproveitamento de Resíduos e amigos do curso: Jozé André, Roberta Queiroz, Talita Gouveia, Ana Paula e Raissa Rattes, Karla Emmanuelle e um agradecimento muito especial a Usina União e Industria, em especial ao meu amigo Ivanderson Rosa, por ceder os espaços para realização da nossa pesquisa.

A todos, meus sinceros agradecimentos e um grande abraço.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Pernambuco destacando a cidade de Primavera.....	16
Figura 2 - Amostras de solo coletadas à campo e pesagem no laboratório.....	18
Figura 3 - Área fotografada superfície de contato pneu-solo dentro do quadro utilizado para delimitação experimental da área.....	19
Figura 4 - Medição da deformação do solo utilizando a metodologia da flecha.....	20
Figura 5 - Relação entre a densidade do solo e a área de contato, para o pneu dianteiro do Caminhão (PDC).....	25
Figura 6 - Relação entre a densidade do solo e a área de contato avaliada, para o pneu dianteiro do Trator (PDT).....	25
Figura 7 - Relação entre a densidade do solo e a área de contato, para o pneu traseiro do Trator (PTT).....	25
Figura 8 - Relação entre a umidade do solo e a área de contato, para o pneu dianteiro do Caminhão (PDC).....	26
Figura 9 - Relação entre a umidade do solo e a área de contato, para o pneu dianteiro do Trator (PDT).....	27
Figura 10 - Relação entre a umidade do solo e a área de contato, para o pneu traseiro do Trator (PDT).....	27
Figura 11 - Formato da área de contato em uma escala qualitativa baseada em faixas de umidade diferentes, obtidas experimentalmente e pelo modelo teórico para o pneu dianteiro de trator (PDT), pneu dianteiro caminhão (PDC), pneu traseiro de trator (PTT), e área teórica.	29
Figura 12 - Relação entre a área de contato e a flecha medida, para o pneu Caminhão PDC.	30
Figura 13 - Relação entre a umidade do solo e a flecha medida, para o pneu dianteiro do Trator PDT.....	31
Figura 14 - Relação entre a densidade do solo e a flecha medida, para o pneu traseiro do Trator PTT.....	31

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos pneus utilizados	17
Quadro 2 – Médias e desvio padrão de densidade de solo (em g.cm^3) das áreas de contato experimentais, de cada local de coleta e tipo de pneu avaliado.....	22
Quadro 3 – Área de contato teórica para os pneus utilizados obtida através do programa Predcomp 1.0.....	23

RESUMO

Compreender as alterações nos atributos físico-mecânicos do solo causados pela relação pneu-solo é fundamental para entender os limites do desenvolvimento da cultura, modificações na superfície do solo e a importância de cada tipo de pneu utilizado pelas máquinas agrícolas. As alterações na área de contato pneu-solo podem variar de acordo com as características do solo ao qual a carga está sendo aplicada e do tipo de rodado utilizado, as características do solo são: rigidez do solo, teor umidade e densidade do solo. Relacionado aos pneus utilizados, podem variar de acordo com seu tamanho, rigidez, espessura, carga suportada e pressão de insuflagem. Este trabalho teve como objetivo avaliar a área de contato pneu-solo em máquinas agrícolas utilizadas na colheita semi mecanizada de cana de açúcar, e mensurar as influências dos atributos: teor de umidade, densidade de solo e a flecha, bem como comparar as áreas medidas com a estimada. O trabalho foi realizado na Usina União e Indústria SA, localizada no município de Primavera, PE. As coletas das amostras foram realizadas nos engenhos Frexeiras, Aurora e Bom Fim, onde estavam sendo realizadas a colheita de cana-de-açúcar. As áreas de contato foram coletadas no momento que as máquinas realizavam o carregamento da colheita. Para isto, foi demarcado toda superfície do pneu com o solo, fazendo uso de cal e, após deslocamento do veículo de transporte, utilizou-se um quadro para demarcar as medições e determinar a medida por meio da análise de imagem, posteriormente a comparação com forma teórica pelo modelo da super-elipse. As áreas de contato apresentaram uma relação inversamente proporcional à densidade e diretamente proporcional ao teor de umidade do solo corroborando com diversos trabalhos realizados por outros autores, referenciando a importância dos atributos densidade e umidade na relação entre a área de contato e o solo. A área avaliada foi, em todos os casos inferior a estimada, assim como as formas da área estimada diferiram da experimental.

Palavras-chave: Compactação do solo; pressão de insuflagem; máquinas, interação pneu-solo.

ABSTRACT

Understanding the changes in the physical-mechanical attributes of the soil caused by the tire-soil ratio is essential to understand the limits of crop development, changes in the soil surface and the importance of each type of tire used by agricultural machinery. Changes in the tire-soil contact area may vary according to the characteristics of the soil to which the load is being applied and the type of wheelset used, the soil characteristics are: soil moisture content and soil density. Regarding the tires used, they may vary according to their size, stiffness, thickness, supported load and inflation pressure. This work aimed to evaluate the tire-soil contact area in agricultural machines used in the semi-mechanized harvesting of sugar cane, and to measure the influences of the attributes: moisture content, soil density and the arrow, as well as to compare the areas measures with the estimated. The work was carried out at Usina União e Industria SA, located in the municipality of Primavera - PE. Samples were collected at the Frexeiras, Aurora and Bom Fim mills, where the sugarcane harvest was being carried out. The contact areas were collected when the machines loaded the crop. For this, the entire surface of the tire was demarcated with the soil, using lime and, after leaving the machine, a chart was used to demarcate the measurements and determine the measurement through image analysis, later the comparison with shape theory by the super-ellipse model. The contact areas showed a relationship inversely proportional to the density and directly proportional to the soil moisture content, corroborating with several works carried out by other authors, referring to the importance of the attributes density and humidity in the relationship between the contact area and the soil. The evaluated area was, in all cases, inferior to the theoretical one, as well as the shapes of the area differed from the experimental one.

Keywords: Soil compaction; inflation pressure; machinery, tire-ground interaction

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Objetivo Geral.....	9
1.2. Específicos.....	9
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	10
2.1. Cana-de-açúcar e mecanização	10
2.2. Compactação do solo	11
2.3. Área de contato pneu-solo	12
2.4. Características e tipos de rodado.....	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3.1. Localização da área de estudo.....	16
3.2. Cenário e características do ambiente experimental.....	16
3.3. Coleta das amostras.....	17
3.4. Densidade e umidade do solo	18
3.5. Determinação da área de contato pneu-solo.....	18
3.6 Deformação do solo	
3.7. Estimativa teórica da área de contato.....	20
3.8. Análise dos dados	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

A utilização de máquinas agrícolas e caminhões são primordial na produção do setor sucroenergético, tratores, colhedoras e caminhões estão entre os diversos maquinários utilizados nas operações de cultivo da cana-de-açúcar, causando intenso tráfego dentro das áreas cultiváveis e vem acarretando mudanças nos atributos físico-mecânicos do solo, como alterações na densidade do solo, taxa de infiltração de água e resistência a penetração, fazendo com que o solo diminua sua capacidade produtiva. Um dos fatores causadores dessas alterações é a compactação do solo através da interação pneu-solo, que sofre estes impactos devido á diversos fatores, como a utilização incorreta do pneu, seja pela escolha do tipo de rodado, seja pela não utilização das recomendações do fabricante e também pelas características dos solos, como a densidade, teor de umidade, presença de palhada e raízes.

Entender a relação área de contato - pneu-solo nos auxilia a compreender melhor como ocorrem os processos de deformação do solo, compactação e alterações nos atributos físico-mecânicos dos solos, através desse conhecimento consigamos criar estratégias de manejo que visem minimizar esses impactos e tornar mais eficiente o uso do solo. A área de contato e a relação pneu-solo, é utilizada como um parâmetro para avaliar os impactos das cargas geradas sobre o solo e as tensões recebidas, além de possibilitar o entendimento de como está estritamente dependente a área de contato pneu - solo com o envolvimento do pneu no perfil do solo e assim compreender o estresse e a propagação do mesmo em todas as camadas do solo.

A escolha do pneu é um fator determinante nesse aspecto, pneus mais largos permitem que a carga seja distribuída de forma mais uniforme no solo, permitindo que a máquina tenha mais estabilidade, além de uma diminuição da patinagem e redução no consumo de combustível, ocasionando um menor desgaste da máquina durante as operações e aumentando sua vida útil.

Cada modelo de pneu apresenta suas características, podendo influenciar na área de contato, de forma a aumentar ou a diminuir a área de contato e conseqüentemente a interação entre o pneu e o solo. Para o pneu às características como o tipo de pneu utilizado, seja ele com garras maiores ou menores, suas características de construção, pressão de insuflagem utilizada na calibração e seu tamanho que está diretamente ligado com a distribuição da carga do pneu no solo e banda de rodagem. Outro fator que influencia diretamente na relação pneu-solo são as características do solo como; teor umidade, afetando o tamanho da interação entre o pneu e o solo, a densidade influenciada diretamente pela compactação do solo, textura do solo, impactando diretamente na interação e absorção das cargas geradas no solo e matériaorgânica que influência todos os outros atributos citados.

A estimativa da área de contato, pode ser determinada através de diversos modelos matemáticos desenvolvidos para avaliar áreas de contato em superfícies sejam elas deformáveis ou indeformáveis, assim como formas geométricas desenvolvidas para mensurar a área de contato.

Para obter a área de contato, o método mais comum é utilizando imagens processadas, que tem como princípio tensionar o pneu contra uma massa onde está adicionado uma fonte com cal e após a secagem obtém-se a área de contato pneu-solo, pode ser feita também, ao utilizar algum produto como cal ou gesso para marcar o pneu na superfície e utilizar papel milimetrado para encontrar a área demarcada.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar os valores, e comportamento dos modelos teóricos da área de contato pneu-solo de máquinas agrícolas utilizadas na colheita semi mecanizada de cana de açúcar.

1.2. Específicos

- a.** Determinar a influência do tipo de rodado e a interação com o solo;
- b.** Avaliar as influências dos atributos teor de umidade e densidade do solo na relação área de contato pneu-solo.
- c.** Comparar os resultados obtidos de área teórica e área experimental.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cana-de-açúcar e mecanização

A produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 deverá crescer 4,4% em relação ao ciclo 2022/23, sendo estimada em 637,1 milhões de toneladas. O incremento é influenciado tanto pelo melhor rendimento das lavouras como pela maior área destinada ao cultivo (CONAB 2023).

Ainda segundo os dados da Conab (2023), no nordeste do país, além da melhora do desempenho das lavouras, foi verificado um incremento na área plantada, resultando em uma produção de aproximadamente 56 milhões de toneladas, aumento de 12,5% em comparação à safra 2021/2022.

O Estado de Pernambuco é um dos principais produtores de cana-de-açúcar da região nordeste, com previsão na safra 2022/2023 de 12.314,3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com área plantada de 230,9 mil hectares, representando 30,3% da área plantada e produção no Nordeste, respectivamente, e rendimento agrícola médio de 54,86 t.ha⁻¹ (CONAB, 2023). A cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos.

Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção buscam aumentar sua eficiência na geração de energia elétrica, auxiliando no aumento da oferta e redução dos custos e contribuindo para ampliar a sustentabilidade do setor (CONAB, 2021). De acordo com Braunack e McGarry (2006), o uso de máquinas, além de demandar altos investimentos iniciais, também pode afetar o desenvolvimento da cultura ao induzir a compactação do solo e potencialmente danificar os colmos remanescentes com o tráfego de máquinas nas lavouras.

Altas tensões aplicadas ao solo alteram seus atributos físicos, resultando em maior grau de compactação, o que diminui o desenvolvimento radicular e a produtividade da cultura da cana-de-açúcar, no entanto, ainda se faz necessário o refinamento das técnicas de mecanização buscando mitigar problemas ainda existentes, como a compactação do solo e os danos causados às socas de cana pelo tráfego inadvertido (SOUZA et al., 2012a). Porém Segundo Usaborisut e Sukcharoenvipharat (2011), o uso intensivo de máquinas pode danificar a estrutura do solo, afetando sua capacidade de reter e conduzir ar, água e nutrientes, eventualmente levando à redução de produtividade.

De acordo com Silva et al. (2004), o intensivo uso de máquinas e implementos

agrícolas contribui para às mudanças nas propriedades dinâmicas e físicas dos solos, o que tem despertado o interesse de pesquisadores para estudos sobre compressão e dinâmica da compactação do solo e os danos causados às socas de cana pelo inadvertido tráfego.

2.2. Compactação do solo

A compactação do solo apresenta elevada capacidade de impactar a produção agrícola através de seus efeitos deletérios aliados à dificuldade dos agricultores em localizar e relacionar seus efeitos à produção sem utilizar equipamentos e técnicas específicas para sua determinação (MUJDECI et al., 2017). Geralmente, as camadas densas são localizadas nas regiões mais profundas do perfil do solo, devido aos efeitos do preparo anterior e manifestam-se por camadas de solo com maior densidade (MOREIRA et al., 2016).

Segundo Gao et al. (2015), a compactação do solo em camadas geralmente limita o crescimento das raízes e a eficiência do uso dos recursos. A variação espacial na resistência mecânica afeta o grau de agrupamento das raízes. O solo é mais susceptível sob condições úmidas do que sob condições seca, onde, o teor umidade ótima é determinada através do ensaio de Proctor, pela relação existente entre a densidade, teor de umidade e a energia de compactação (KLEIN et al., 2014), portanto, não se recomenda trafegar a umidades próximo da umidade ótima para evitar a intensificação desse processo.

Os vários tipos de solos são afetados de maneira diferente e a compactação implica, principalmente, na criação de um ambiente desfavorável para o desenvolvimento das raízes das plantas e também contribui para a gradativa degradação de sua estrutura. Segundo Belinaso et al. (1994) um dos maiores problemas de compactação do solo nas áreas canavieiras é resultante do uso de equipamentos rodoviários utilizados no transporte de matéria-prima.

Kumar et al. (2019), observaram que o aumento de lastro nas máquinas agrícolas de tração, incrementa a potência desenvolvida, favorecendo o aprimoramento energético. Entretanto, o excesso de massa das máquinas impacta o solo de forma irreversível em muitos casos, principalmente quando a operação é realizada em solo com alto teor de água.

De acordo com Silva et al. (2016), a resistência mecânica do solo à penetração tem sido usada em todo o mundo para a detecção de camadas em estudos sobre a ação de máquinas no solo e na prevenção de impedimentos mecânicos no desenvolvimento do sistema radicular das plantas. A compactação do solo por equipamentos de colheita pode deteriorar o ambiente radicular devido a mudanças no solo, estrutura de poros e maior resistência à penetração (AMPOORTER et al., 2010).

Segundo De Paula (2010b) os pneus rodoviários trafegam com altas cargas no eixo,

em pisos planos e compactos, sob altas velocidades e elevadas pressões de insulflagem (70 a 100 psi, 483 a 689 kPa). Os pneus agrícolas, por sua vez, suportam baixas cargas verticais, operam em pisos irregulares e não compactados, a baixas velocidades e com pressão de inflação menor (10 a 20 psi, 68,9 a 137,8 kPa). Além disso, outra causa da compactação é o excesso de carga no eixo dos veículos de transporte utilizando-se pneus convencionais, com carga de mais de 12 t por eixo e que provavelmente provocaram compactação abaixo da camada cultivável do solo (De PAULA, 2010c).

O uso de máquinas com pneus maiores e cargas de roda mais altas, no entanto, aumentou o risco de exceder o limite proposto para o tráfego sustentável e, portanto, o risco de compactação (SCHJØNNING et al., 2015). O processo de compactação se dá pelo aumento da densidade aparente frente a redução do volume de poros do solo, podendo ocorrer naturalmente ou pela transmissão das tensões excessivas na superfície do solo via tráfego agrícola (MOSSADEGHI- BJÖRKLUND et al., 2019)

2.3. Área de contato pneu-solo

De acordo com Sandu et al. (2019), o termo "área de contato" refere-se à parte da roda ou pneu que está em contato com a superfície de apoio, e pode ser classificada em dinâmica e estática, "área de contato dinâmica" é a interface pneu-solo, quando há um carregamento dinâmico, ou seja, em movimento. A determinação da área de contato pneu-solo é importante porque, aumentando-se a área superficial sujeita a uma dada pressão, haverá uma redução na pressão máxima experimentada em todas as profundidades dentro do perfil do solo sob carga. Consequentemente, reduzindo-se a pressão superficial pela distribuição da carga sobre uma área maior, decrescerá a pressão máxima em subsuperfície (SILVA et al., 2007).

O aumento da área de contato solo-pneu reduz o efeito negativo do movimento do trator sobre o campo e restringe a degradação física das características do solo (ŠMERDA e ČUPERA, 2010). A "área de contato estática" é a área entre o pneu e superfície deformável, quando o pneu é carregado estaticamente, sem movimento. A estimativa da área de contato contribui para a determinação das pressões de contato, da relação tensão-deformação e do risco potencial de compactação. Aumentando a superfície de contato entre pneu e solo pode-se reduzir os índices de deslizamento, aumentar a força de tração disponível e diminuir o consumo de combustível por área trabalhada (FRANTZ, 2011).

Segundo Thorpe (2022), algumas características que podem alterar a área de contato pneu-solo, variam em função do pneu, como o tipo, tamanho, rigidez da carcaça,

pressão de insuflagem, carga no pneu, assim como, variam em função de características do solo como a textura, umidade, e rigidez do solo. Resultados encontrados por Barik et al. (2014) demonstraram que o contínuo tráfego de máquinas influencia diretamente a estabilidade dos agregados, a densidade, a resistência à penetração, o teor de água e a porosidade do solo.

Segundo Way e Kishimoto (2004) a tensão na área de contato pneu-solo não é uniformemente distribuída e que a máxima tensão pode ser muito maior do que a pressão de inflação dos pneus, a tensão no solo é maior abaixo do centro do pneu, reduzindo para as bordas laterais (MOHSENIMANESH e WARD, 2007). À medida que a área de contato do pneu com o solo aumenta, a carga da roda é distribuída de forma mais ampla no solo. Utilizando um pneu com maior largura de banda de rodagem, ou mesmo utilizando uma pressão de insuflagem menor e uma lateral mais flexível, área de contato se torna maior e há uma redução na resistência ao rolamento e no combustível consumido (PARKHOMENKO et al., 2019).

Em operações agrícolas a interação pneu-solo é muito importante pois está sujeita a influenciar à compactação do solo, resistência ao rolamento, perda de energia, e o deslizamento das rodas são o resultado da interação pneu-solo (TAGHAVIFAR e MARDANI, 2013). Mazetto et al. (2004), afirmam que as características de eficiência de um rodado dependem, não somente da pressão de contato, mas também do tamanho e formato da área de contato, concluindo que, para um rodado pneumático, a aproximação elíptica é a melhor maneira de estimar a área de contato do pneu com a superfície do solo.

Dessa forma, é de suma importância entender a interação entre a área de contato dos pneus com o solo e os fatores que impactam, desde as características do solo as características do pneu, com isso compreender que todo esse processo garante um bom desempenho de tração, minimizando os impactos ao solo.

2.4. Características e tipos de rodado

De acordo com Spagnolo et al. (2012) a escolha do modelo adequado de pneu para um trator agrícola não deve ser baseada simplesmente em suas funções principais, como suporte de carga vertical nos eixos, transmissão de potência e produção de força de tração. Muitos pneus são construídos com tecnologias avançadas que lhes permitem transportar cargas altas em pressões de inflação bastante baixas (SCHJØNNING et al., 2012).

Porém há uma demanda crescente para determinar a capacidade de carga dos vários tipos de superfícies de rolamento e, assim, selecionar o pneu mais adequado em termos de

eficiência energética do veículo e desgaste, o que permitirá que um veículo tenha o melhor desempenho de tração (BEKAKOS et al., 2017).

Segundo Mitas et al. (2013), em geral, os pneus são constituídos de 4 partes principais sendo elas, carcaça banda de rodagem, flanco e talão. Carcaça: é a parte de resistência do pneu, constituída de lonas de poliéster, nylon ou aço, retém o ar sob pressão que suporta o peso total das máquinas agrícolas, a banda de rodagem é a parte do pneu que entra diretamente em contato com o solo, formada por um composto especial de borracha que oferece grande resistência ao desgaste, protegem a carcaça de lonas, são dotados de uma mistura especial de borracha com alto grau de flexibilidade. Talão: são constituídos internamente de arames de aço de grande resistência e tem por finalidade manter o pneu acoplado. Flanco: parte lateral do pneu e tem a função de proteger a carcaça. É constituída de borracha com alto grau de elasticidade

Considerando a forma de estrutural do pneu, têm-se três tipos de pneus agrícolas: os baixa pressão e alta flutuação (BPAF), radiais, e diagonais. Os pneus de baixa pressão e alta flutuação (BPAF) tem lonas com os cordonéis dispostos diagonalmente em relação à linha de tração do pneu. A banda de rodagem possui uma correia que lhe confere características planas. Pode-se dizer que este tipo de pneu tem banda de rodagem radial e lados diagonais, portanto, possui maior flexibilidade e resistência.

Os pneus BPAF são mais largos e não podem ser reformados, portanto, o custo de compra é mais alto (SHULMAN, 2019; BOCKSTAL et al., 2019). Os pneus radiais, são formados por lonas presentes na carcaça organizadas de talão a talão, acompanhando o sentido do raio da circunferência, com uma cinta que deixa a área de rodagem mais rígida, de modo a oferecer maior estabilidade às barras quando fazem contato com o terreno, sendo constituídos de poliéster, pois é um material que oferece menos resistência aos impactos (SHULMAN, 2019; BOCKSTAL et al., 2019).

O pneu diagonal, partiu do princípio do tubo amarrado ao aro por faixas acaba sendo incorporado à estrutura do pneu em 1904. Os reforços, criados com faixas de algodão, davam à peça maior estabilidade e comportamento mais previsível, mas sua durabilidade era baixa. No decorrer dos anos os pneus diagonais passaram por várias atualizações, onde passar a utilizar uma estrutura de sobreposição de lonas, o que gera uma aparência diagonal (da SILVA et al., 2017).

Segundo Silva et al. (2017), os pneus diagonais utilizam uma estrutura de sobreposição de lonas, o que gera uma aparência diagonal: uma lona passa sobre a outra, resguardada por fibras têxteis. Como as lonas não sofrem fricção entre si, o risco de aumentar

a temperatura interna no pneu é reduzido. Esse fato, em conjunto com sua rigidez, contribui para sua durabilidade. Devido a essa rigidez, a área de contato desse pneu tende a ter uma forma semelhante à de um retângulo. E sua principal vantagem é a alta estabilidade dimensional, o que impede que a carcaça sofra deformações permanentes ou sérias (SILVA et al., 2017). Dessa forma, possui uma maior durabilidade que o diagonal, contribuindo para que haja uma maior economia ao longo do tempo (BOCKSTAL et al., 2019).

Para se estabelecer condições de trabalho de um pneu, considerando-se as suas características de construção, é necessário conhecer algumas variáveis, como a pressão de inflação, a área de contato do pneu com o solo, e a resistência à penetração gerada quando aplicadas distintas cargas sobre o solo (NAGAOKA et al., 2002). A pressão de inflação tem papel fundamental na área de contato entre o pneu e o solo, além da distribuição de pressão na sua superfície, sendo que para uma menor compactação do solo e maior eficiência, deve-se ter uma maior área de contato do pneu com o solo, utilizando-se menores pressões de inflação dos pneus (MASIERO et al., 2011). Para Janulevicius e Damanauskas (2015), a pressão dos pneus e carga de roda são os dois parâmetros facilmente gerenciados que desempenham um papel significativo no controle do deslizamento, tração força e consumo de combustível de um trator.

De acordo com Misiewicz et al. (2015), a pressão adequada dos pneus proporciona um equilíbrio dinâmico ao trator, maior eficiência de tração e melhor contato da banda de rodagem com o solo. Essa distribuição de pressão e da área de contato é fundamental para minimizar os efeitos da compactação (JADOSKI et al., 2016). A adequação de um trator agrícola visando à utilização de pneus ajustados para diferentes condições superficiais de solo resulta em melhor desempenho geral com consequente aumento da capacidade operacional, aumento da vida útil, melhor qualidade de serviço e menor custo operacional (SOUZA, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Localização da área de estudo

O trabalho foi realizado na usina União e Industria S/A, localizada no município de Primavera, PE, distante à 81 km de Recife, com altitude de 129 metros, e latitude 08° 19'53" sul e longitude 35°21'15" oeste. Segundo a classificação de Köppen, a área onde foi realizada a pesquisa apresenta clima do tipo As', tropical quente e úmido, com chuva de outono-inverno, possuindo duas estações bem definidas, uma seca que se prolonga de setembro a fevereiro e uma outra chuvosa no período de março a agosto (Jales et al., 2012).

As coletas foram realizadas entre os meses de setembro e novembro de 2023, nas áreas onde estavam ocorrendo a colheita semi mecânizada de cana de açúcar.



Figura 1 - Mapa de Pernambuco destacando à cidade de Primavera.

3.2. Cenário e características do ambiente experimental

O trabalho foi realizado nas áreas onde estavam ocorrendo a colheita de cana-de-açúcar nos engenhos Frexeiras, Aurora e Bom Fim, todos localizados no município de Primavera. No engenho Frexeiras o canaviaal estava em seu sexto corte, enquanto no engenho Aurora sétimo corte e no engenho Bom Fim quinto corte, em todas as áreas não houve preparo de solo desde o plantio, e durante as colheitas os caminhões, tratores e outros implementos circulam dentro das áreas. Para avaliação da área de contato pneu/solo foram, utilizados três tipos de pneus: pneu dianteiro do caminhão (PDC), pneu dianteiro do trator (PDT) e pneu traseiro do trator (PTT). As coletas foram realizadas dentro dos talhões, com os veículos estacionado, as amostras de solos para análise de densidade de solo e umidade foram coletadas na profundidade de 0-20 cm.

O trator utilizado foi o New Holland tl 80, com tração 4x2 com peso total de 3.740 kg, sendo que 40% desse peso é frontal e 60% é traseiro, o trator se encontrava com lastro

dianteiro. O Caminhão utilizado foi o Volvo FM 520 com tração 4x2 com peso total de 9.376 kg, sendo eixo dianteiro 5.675kg e eixo traseiro 3.701.

As características dos pneus utilizados foram obtidos através do manual do fabricante, e as informações sobre como está sendo utilizado nas áreas, referentes a calibração, pressão utilizada, níveis de água, foram obtidos nas áreas de calibragem e ajustes da usina. Para todos os tipos de pneus utilizados, foi verificado uma diminuição de 10% na pressão utilizada comparado ao recomendado pelo fabricante, de acordo com os informações da usina, essas pressões são utilizadas pois são as que melhor se adaptam as características da região.

Quadro 1 - Características dos pneus utilizados.

Tipo de Rodado	Caminhão Radial	Trator dianteiro Diagonal	Trator traseiro Diagonal
Pressão utilizada (kPa)	772	151	137
Pressão recomendada (kPa)	850	137	124
Diâmetro (cm)	134,2	90	150
Largura (cm)	29	55,8	65
Água (L)		150	300

As áreas onde as avaliações ocorreram, foram selecionadas seguindo as mesmas características de solo e relevo, no engenho Aurora, Frexeiras e engenho Bom Fim.

3.3. Coleta das amostras

As amostras de solo foram coletadas de maneira a ficarem bem próximas das características encontradas a campo e representativas das áreas (indeformadas). O solo das amostras indeformadas foram coletados com auxílio do amostrador tipo Uhland em anéis cilíndricos de aproximadamente 5 cm de altura e com bordas cortantes (Figura 2). Para as análises da umidade o solo foram coletadas na profundidade de 10 cm e adicionado ao recipiente (Figura 2).

Após a coleta, as amostras foram identificadas e envoltas em filme plástico e levadas até o Laboratório de Física do Solo do IFPE – Campus Vitória de Santo Antão, para serem realizadas as análises.



Figura 2 - Amostras de solo coletadas à campo e pesagem no laboratório

3.4. Densidade e umidade do solo

Para determinar a densidade de solo seguiu-se a metodologia do manual de métodos de análise de solo da Embrapa (2017). Para obter o valor da umidade gravimétrica (U_g), determinou-se de acordo com as equações (Viana et al., 2017), onde é subtraído a massa de solo seco (M_{ss}) da massa de solo úmido (M_{su}) e posteriormente dividida pela massa de solo seco.

$$U_g = \frac{M_u - M_s}{M_s}$$

A densidade do solo foi determinada, conforme metodologia proposta por Almeida et al. (2017). Onde a densidade de solo (D_s) é igual a massa de solo seco (M_{ss}) é dividida pelo volume do solo (V)

$$D_s = \frac{M_s}{V}$$

3.5. Determinação da área de contato pneu-solo

A determinação da área de contato pneu-solo foi realizada utilizando uma metodologia segundo Mazetto et al. (2004), onde o pneu foi posicionado verticalmente sobre o solo e o contorno do contato com o solo delimitado por adição de cal, após a saída do pneu,

um quadro de madeira (gabarito), com 0,80 m de comprimento e 0,50 m de largura, colocado sobre o solo, para ser capturado uma imagem junto com a área de contato do pneu (Figura 3).

Nessa fase realizou-se as imagens com uma câmera digital, posteriormente foram transferidas para o computador e por meio do software AutoCAD ajustadas as proporções do tamanho real utilizando a função “Scale”. Posteriormente utilizando a função “Polyline”, foi estabelecido manualmente o perímetro de cada área de contato.

Os valores referentes às áreas encontrados no AUTOCAD, foram utilizados para obter a área de contato real relacionando a área real do quadro de madeira (A_q), área de contato na foto, obtida no software (A_{pf}) e área do quadro na foto (A_{qf}), medidas em m^2 .

$$A = \frac{A_q \cdot A_{pf}}{A_{qf}}$$



Figura 3 - Área fotografada superfície de contato pneu-solo dentro do quadro utilizado para delimitação experimental da área.

3.6 Deformação do solo

Para determinação da deformação do solo na área de contato, foi utilizado o modelo segundo Sharma e Pandey (1996), onde foi utilizado o modelo da flecha para determinar a deformação real do solo, através da trilha de roda deixada pela máquina, nos tratamentos.

A treliça é posicionada entre a trilha de roda deixada pelos pneus e medidas em centímetros, na seção transversal média de cada superfície de avaliação, demarcada previamente. A treliça e sua utilização seguem a norma DNIT 007/2003 – PRO.

As coletas foram realizadas apenas para os pneus dianteiros de trator devido as trilhas para os pneus traseiros ficarem sendo mascarados, devido a passagem inicial do pneu dianteiro trator. Para o caminhão, as coletas não foram obtidas, devido ao fato do caminhão não circular nessa área (área de primeiro corte).



Figura 4 - Medição da deformação do solo utilizando a metodologia da flecha.

3.7. Estimativa teórica da área de contato

A área teórica é estimada com base na forma da super-elipse, onde a área de contato é descrita pela equação:

$$\frac{x^n}{a^n} + \frac{y^n}{b^n} = 1$$

Em que o expoente n , é um número real positivo que determina a forma, e os parâmetros a e b determinam o comprimento do semi eixos principais e, portanto, as proporções de a superfície. Esses parâmetros fornecem a distância da origem até os pontos onde a curva cruza os eixos x e y , respectivamente. Quando $n = 2$, a curva é uma elipse que se transforma em um círculo se $a = b$. A forma da curva para diferentes valores de n quando $a = b$ (Hallonborg, 1996).

Utilizando como base o modelo de Keller (2005), a largura da área de contato y , é dada pela largura do pneu (L), enquanto x é o comprimento da área de contato (CA), e depende do diâmetro (d), pressão de insuflagem (P) e pressão de insuflagem recomendada (P_{rec}) do pneu. O formato da área de contato é obtido pelo parâmetro n que é dependente do diâmetro (d) e da largura do pneu (W).

$$CA = 0,47 + 0,11d^2 - 0,16 \ln (P_{ins} P_{rec})$$

$$n = 2,10(Wd)^2 + 2$$

3.8. Análise dos dados

Os dados para análise multivariada dos componentes principais e análise de regressão foram realizados por meio do software R (R Core Team, 2017). Posteriormente, as médias e desvios padrão foram plotados para análise quantitativa. A dispersão dos dados foi gerada, relacionando a área de contato com a densidade e umidade, para observação das linhas de tendência e do coeficiente de determinação (R^2). Os dados das áreas teóricas foram obtidos através do programa Predcomp 1.0.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Quadro 2, apresenta os valores médios de densidade do solo relacionados aos tipos de pneus utilizados e os locais onde os dados foram coletados. As densidades do solo não apresentaram variações entre os pneus dentro das áreas, mas, variaram dentro das áreas de coletas.

Quadro 2 – Médias e desvio padrão de densidade de solo (em g.cm³) das áreas de contato experimentais, local de coleta e tipo de pneu avaliado.

Pneus	Áreas de coleta (Engenhos)		
	Frexeiras	Aurora	Bom Fim
PDC	1,6	1,82	1,74
PDT	1,57	1,85	1,80
PTT	1,54	1,77	1,76
Desvio Padrão	0,159	0,147	0,135

PDT: pneu dianteiro do caminhão, PDT: pneu dianteiro do trator, PTT: pneu traseiro do trator.

Os resultados de densidade do solo (Quadro 2) encontrados nas áreas, apresentaram uma grande variação de acordo com os locais onde foram coletado. As áreas apresetaram diferentes valores de densidades, sendo mais elevado em alguns pontos, esses valores de densidade é provocado pela entrada das máquinas nos talhões associadas a idade dos canaviais, para realização das colheitas.

Os resultados obtidos dos valores de área de contato apresentaram maiores valores a medida que a densidade do solo (Figura 5, 6 e 7) reduziram, havendo uma tendência linear sobre os dados. Os resultados foram encontrados para todos os tipos de pneus avaliados, mostrando a importancia de se entender as interações entre o pneu-solo, seus atributos e os danos causados ao sistema através da escolha do tipo de rodado utilizado. Por outro lado independentemente da densidade do solo avaliado, a área de contato estimada, Keller (2015) obteve valores superiores aos levantados.

Para os pneus dos tratores sua variação de área de contato referentes a densidade do solo foram bem semelhantes, como as características dos pneus permaneceram constante durante as observações, é possível afirmar que os fatores da superfície do solo e as áreas de coletas, assim como a pressão de inflação influenciaram nas variações da área de contato, o que é corroborado por Raper et al. (2006) onde a inobservancia da adequada pressão de inflação dos pneus também afeta sensivelmente o solo e que a observancia da pressão

adequada dos rodados é fundamental na redução da compactação causada por veículos agrícolas. Mion et al. (2016) estudando diferentes pressões do pneu de um trator observaram que pressões altas favorecem reduções na área de contato do pneu com a superfície do solo.

Sharma & Pandey (1996) afirmam que as características de eficiência de um rodado dependem, em grande parte, não somente da pressão de contato, mas também do tamanho e da forma da área de contato. Ao relacionar as diversas áreas de contato com a densidade do solo obteve-se um ajuste linear com a redução da área de contato e aumento da densidade do solo, essa linearidade é representada pela representação do R^2 com 0,94; 0,96 e 0,85 respectivamente, para o pneu dianteiro do trator, pneu dianteiro do caminhão e pneu traseiro do trator (Figura 5, 6 e 7). Por outro lado, a pesquisa de campo é caracterizada por uma maior variabilidade nos resultados principalmente devido a influência significativa das condições atmosféricas e processos naturais como a presença de palhada, raízes e características gerais dos solos com densidade, teor de argila, densidade de partículas.

Para os diversos locais onde foram desenvolvidos os trabalhos e as características dos pneus utilizados, e relacionando com a área de contato estimada, obtida através do programa Predcomp 1.0, foi possível observar que há uma diferença entre a estimada e área obtida, sendo a estimada estatisticamente superior a obtida, sendo este resultados corroborados por Sandu et al. (2020) que utilizou uma modelagem específica para área de contato e encontrou que a estimada foi menor que obtida, atribuindo essa superestimação da área de contato à forma da superfície, pois essas propriedades não estão incluídas em seu modelo, assim como, não estão no da super-elipse.

Quadro 3 – Área de contato estimada para os pneus utilizados obtida através do programa Predcomp 1.0.

Pneu utilizado	Área de contato cm^3
PDC	1700
PDT	2700
PTT	4500

PDC: pneu dianteiro caminhão, PDT: pneu dianteiro trator, PTT: pneu traseiro trator.

As áreas teóricas (Quadro 3) obtidas através do programa Predcomp 1.0, apresentaram valores elevados, 1700, 2700 e 4500 para PDC, PDT e PTT respectivamente (Figura 5, 6 e 7) mostrando que há uma super estimação dos valores das áreas estimadas

referentes a área obtida.

Estudo realizado por Teimourlou & Taghavifar (2015) concluíram que na determinação e descrição da área de contato com a geometria de superelipse as diferenças entre a área estimada e a obtida encontrada mostra que os modelos apresentam dificuldades em produzir uma área de contato aproximada, dando resultados normalmente com valores superiores, isso dá a presença de algumas características do solo com teor de umidade, densidade, presença de palhada, raízes e também de algumas características do rodado que não são levados em consideração, o que é corroborado por Grecenko (1995) que revisou as equações que visam estimar a área de contato, mas todos eles têm algumas limitações.

Eles podem exigir valores de parâmetro que não estão prontamente disponíveis; sua aplicação pode ser restrito a uma gama estreita de pneus ou condições de solo; ou eles podem não estimar os efeitos de um parâmetro importante, como a largura do pneu. Essas limitações exigiram o desenvolvimento de um novo método de modelo empírico.

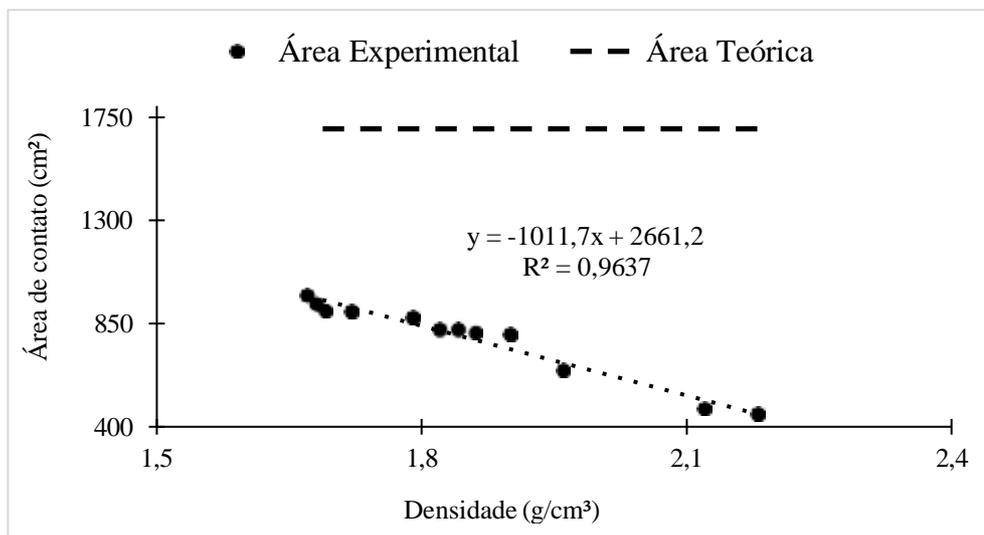


Figura 5 - Relação entre a densidade do solo e a área de contato avaliada, para o pneu dianteiro do Caminhao (PDC).

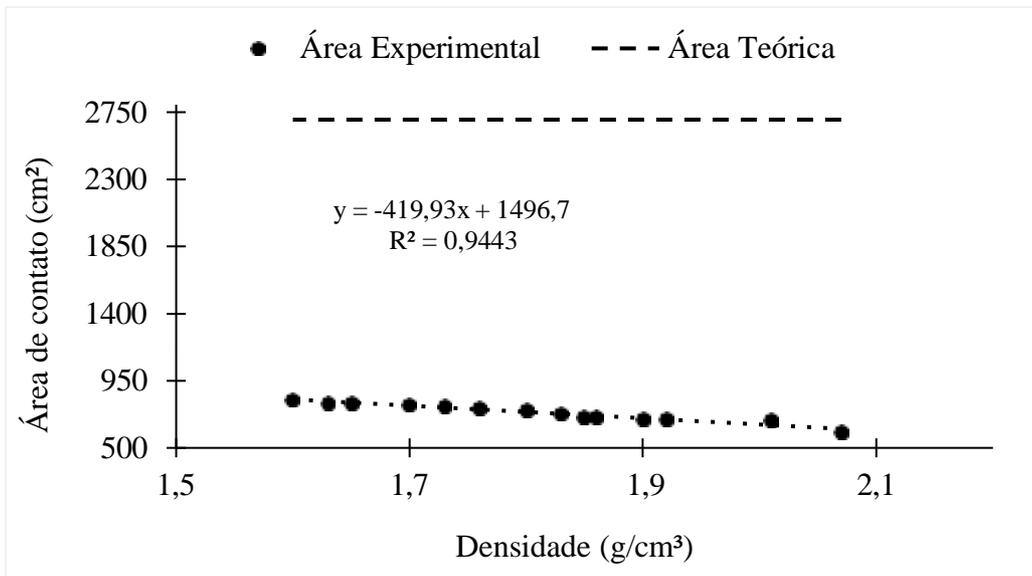


Figura 6 - Relação entre a densidade do solo e a área de contato avaliada, para o pneu dianteiro do Trator (PDT).

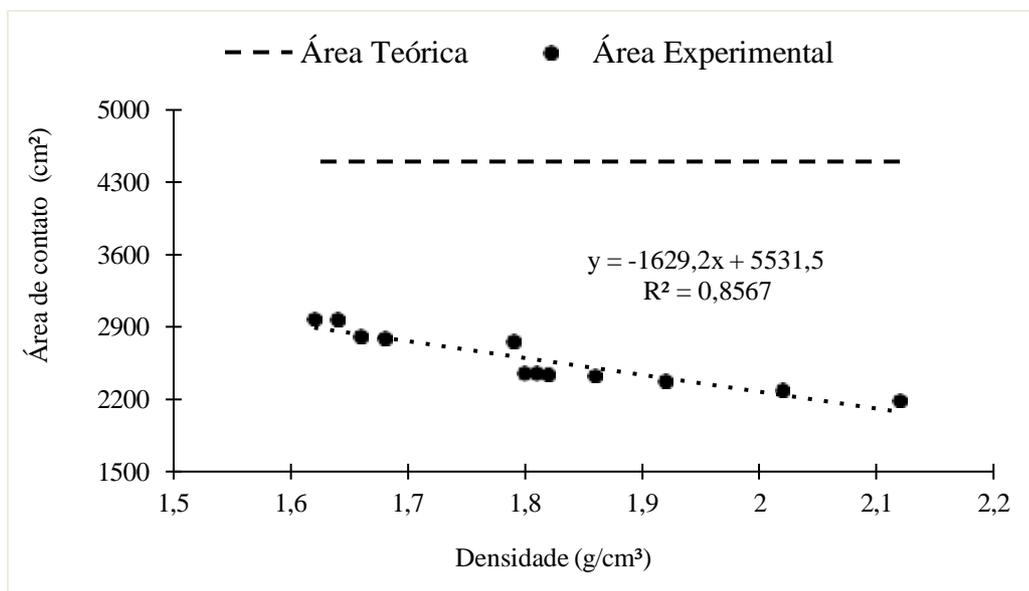


Figura 7 - Relação entre a densidade do solo e a área de contato avaliada, para o pneu o pneu traseiro do Trator (PTT).

Á área de contato relacionada a umidade do solo apresentou um ajuste linear em todos os tipos de pneus avaliados, o aumento entre área e umidade é proporcional durante o experimento, quanto maior a umidade do solo, maior a área de contato, mostrando uma relação direta entre os parâmetros avaliados, resultados semelhantes foram encontrados por Fernandes et al. (2018), que avaliaram a área de contato e a profundidade de recalque em dois solos, com diferentes teores de água; para os dois solos avaliados a área de contato foi maior nas condições em que o teor de umidade foi mais alto e que a aplicação de cargas

dinâmicas no solo pelos rodados agrícolas produziu tensões na interface solo/pneu que foram dependentes do teor de água do solo e do número de repetições dessas cargas.

A umidade do solo influencia diretamente os outros atributos do solo como densidade e porosidade do solo. Hamza et al. (2011) ao avaliar a compactação do solo em profundidade sob diferentes níveis de umidade aplicando cargas externas concluiu que os efeitos destes dois fatores acarretaram num aumento preocupante da densidade na camada superficial. A uma ampla faixa de variação da umidade do solo nas áreas de coleta resultando numa maior variabilidade de área de contato do pneu com o solo quando comparamos o PDC e os pneus do trator, nas faixas avaliadas, para os PDT e PTT as faixas de umidade são bem próximas fazendo com que a diferença de área seja relacionada com as características do pneu, como, largura e diâmetro.

As áreas máximas de contato foram encontradas nas maiores umidade do solo, mostrando a interação sinérgica entre os dois parâmetros e mostrando a influência do teor de umidade presente no solo nas relações de contato entre o pneu e o solo, ocasionando adensamento do solo e futuras áreas compactadas devido a maior interação, isso é corroborado no estudo de Fernandes et al. (2018) onde concluíram que o tráfego no solo agrícola com elevado teor de água resultou em uma compactação excessiva. Resultados semelhantes foram obtidos por Leite et al. (2010) que estudaram a influência de diferentes teores de água e níveis de pressão no pneu, sobre a área e profundidade de recalque, e concluíram que quanto maior o teor de água no solo, maior foram a área e o recalque.

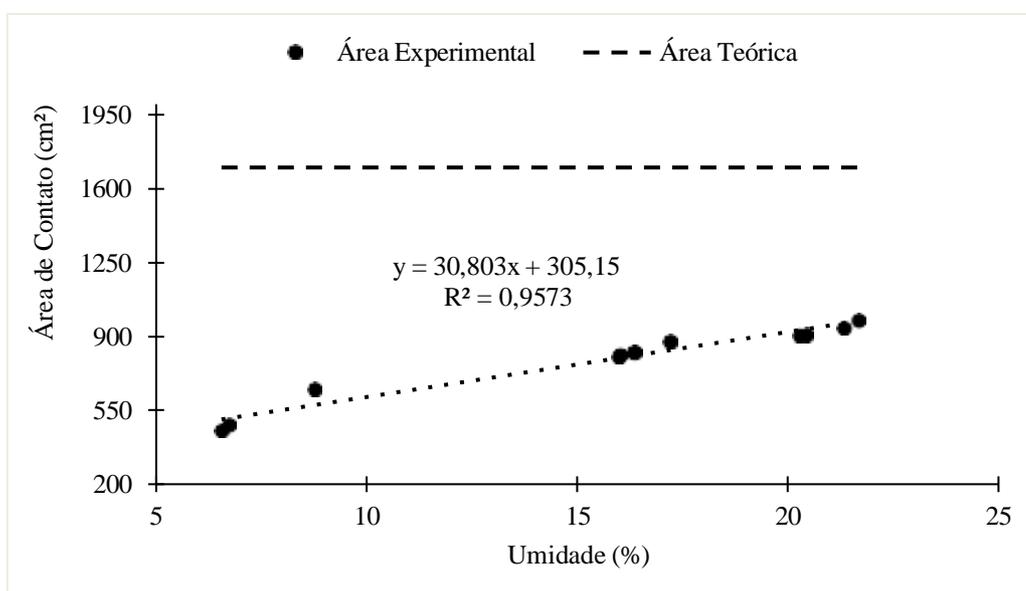


Figura 8 - Relação entre a umidade do solo e a área de contato, para o pneu dianteiro do Caminhão (PDC).

Observou-se que para as áreas onde foram coletadas os valores de umidade máximo, para cada tipo de pneu foram 22,4, 21,6 e 21,4%, respectivamente para PDC, PDT e PTT.

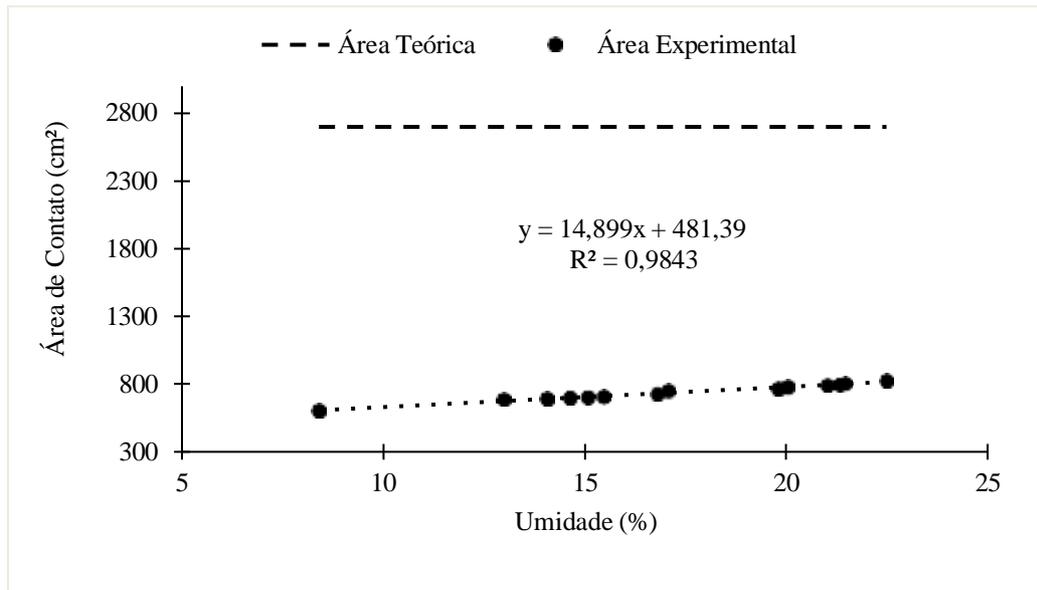


Figura 9 - Relação entre a umidade do solo e a área de contato, para o pneu dianteiro do Trator (PDT).

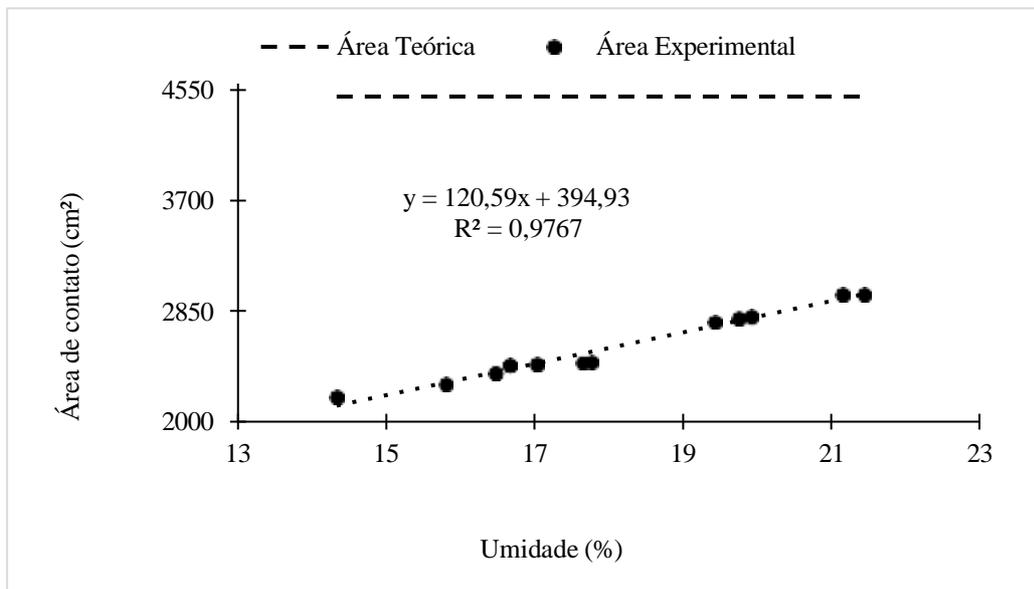


Figura 10 - Relação entre a umidade do solo e a área de contato, para o pneu traseiro do Trator (PTT).

As formas das áreas apresentam suas características de acordo com o teor de umidade, as faixas de umidade foram escolhidas de acordo com os resultados mostrados no experimento, sendo as faixas de 8%, 16% e 24% de umidade representativas no experimento.

Foi possível observar que, quanto maior a faixa de umidade presente no solo, maior o contato e também a forma em que a área se apresenta. O aumento do teor de água no solo reduz a resistência interna das partículas, uma vez que forma uma camada líquida que envolve partículas e agregados do solo, o que reduz o atrito e facilita a deformação (Araujo-Junior et al., 2011)

Quanto menor a área, maior a tensão localizada do contato com solo, corroborando com os resultados encontrados por Schjonning et al. (2008), onde a tensão no solo é maior abaixo do centro do pneu. Mohsenimanesh & Ward (2007) demonstraram que o aumento da pressão concentra a tensão no meio do pneu, ocorrendo redução nas laterais e que o aumento do valor da carga levou a um aumento de tensão nas bordas, concluindo que é importante o estudo da interação pneu-solo, pressão e carga nos rodados.

Comparando a área teórica com a experimental e levando em consideração a umidade presente na área de coleta, pode se notar a diferença significativa entre as características das formas, e sua distribuição no solo, correspondendo pelos valores das áreas teóricas encontradas (Figura 6). O aumento do teor de água no solo reduz a resistência interna das partículas, uma vez que forma uma camada líquida que envolve partículas e agregados do solo, o que reduz o atrito e facilita a deformação (Araujo-Junior et al., 2011).

Há uma grande variabilidade nas formas encontradas, para este tipo de modelo da superelipse consegue ser representativo para todas as formas, segundo Hallonborg (1996), a superelipse fornece um excelente meio para descrever, em uma forma matemática simples, a forma e o tamanho de áreas de contato amplamente variáveis, desde círculos, superelipses para quadrados ou retângulos.

É possível observar as proximidades nas características dos PDT e PDC. Esses resultados podem estar relacionados à propriedade de deformação do pneu, já as áreas de PTT apresentam menores variações nas suas formas, esse resultado indica que o PTT possui uma estrutura mais flexível, apresentando áreas de contato maiores, principalmente quando utilizado em baixas pressões de insuflagem (Kučera et al., 2016). Como todos os pneus estavam com 10% abaixo da pressão de inflação recomendada pelo fabricante dessa forma, ele causa uma maior deformação no solo e conseqüentemente uma área de contato com esse formato (Damme et al., 2021). A pressão baixa dos pneus ou a carga alta podem causar sobrecarga nos pneus e o solo macio causa grande afundamento, ambas as condições fornecem áreas de contato que não são mais elípticas e a parte central da área de contato tende a ser retangular (Hallonborg, 1996).

Segundo Paula (2008), baixas pressões interna ou altas cargas podem levar a uma

sobrecarga nos pneus, provocando grandes deformações no solo. Estas deformações estão relacionadas à área de solo mobilizada e a profundidade do recalque do pneu no solo. De acordo com Hallonborg (1996), a pressão baixa dos pneus ou a carga alta podem causar sobrecarga nos pneus e o solo macio causa grande afundamento. Ambas as condições fornecem áreas de contato que não são mais elípticas e a parte central da área de contato tende a ser retangular.

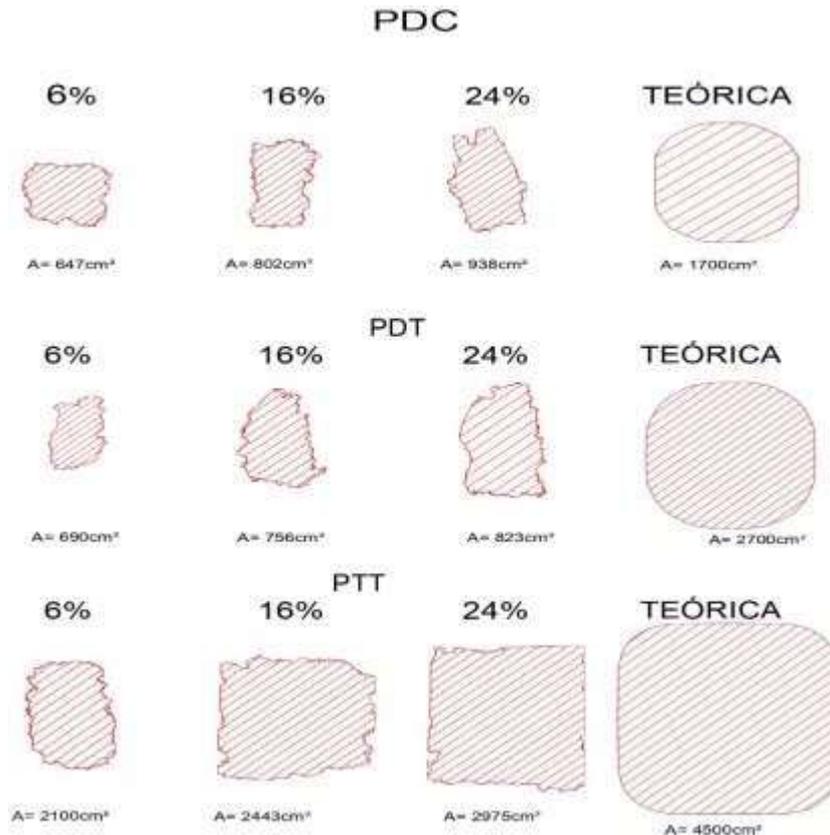


Figura 11- Formato da área de contato em uma escala qualitativa baseada em faixas diferentes de umidade, obtidas experimentalmente e pelo modelo teórico para o pneu dianteiro de trator (PDT), pneu dianteiro caminhão (PDC), pneu traseiro de trator (PTT), e área teórica.

Observa-se, nas áreas onde foram coletadas amostras e foi possível utilizar a flecha (Figura 11), uma maior área de contato entre pneu e o solo para todos os tipos de pneus e máquinas avaliadas, o que é corroborado pela menor compactação do solo nas camadas de 0-20 cm, essas áreas estavam em seu primeiro corte, os resultados obtidos corroboram com Cavalcanti et al. (2019) que avaliaram sucessivas colheitas de cana-de-açúcar (plantio à renovação) em um Argissolo Amarelo distrofico, afirmando que consecutivas colheitas proporcionam incremento de matéria orgânica no solo, possibilitando melhoria na qualidade

física, entretanto, pode crescer levemente o grau de compactação e a tensão de pré-consolidação em virtude da intensidade do tráfego agrícola.

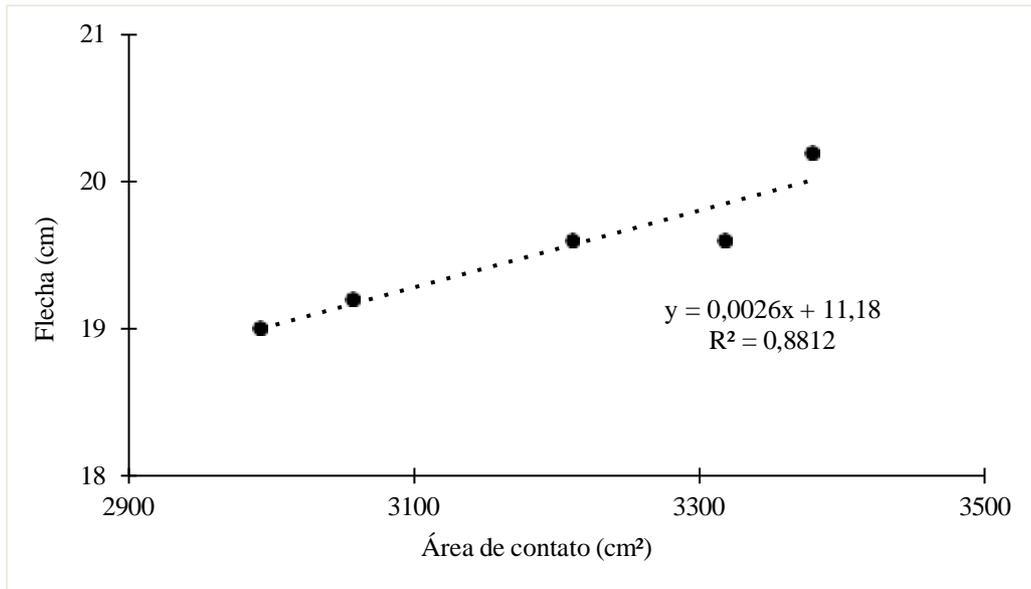


Figura 12- Relação entre a área de contato e a flecha medida, para o pneu dianteiro trator, PDT.

É possível observar que, quanto maior o valor da flecha, maior a área de contato (Figura 12), evidenciando a relação direta entre a deformação do solo e a área de contato, os valores crescem e apresentam uma linearidade, exemplificado pelo R^2 de 0,881, onde o valor do R^2 pode ser um indicativo de que a densidade é um fator determinante para formação da área de contato nas áreas onde utilizamos a flecha e que a mesma influencia diretamente com os outros fatores do solo. Ao relacionar a densidade com área de contato do pneu dianteiro de trator (PDT) onde não foram possíveis obter a flecha devido a não deformação do solo (Figura 14), com a área onde foi possível obter a flecha, podemos concluir que a densidade do solo é um fator determinante para a metodologia utilizando a flecha para medir a deformação do solo através da passagem dos pneus. Área versus flecha se mostrou uniforme e crescente, onde o crescimento crescente da reta reflete o aumento da flecha e da área de contato.

A umidade apresentou-se proporcional a flecha (Figura 13) quanto maior a área de contato, maior o valor da flecha, isso ressalta a importância da umidade do solo enquanto um dos atributos físicos do solo com grande influência no processo de deformação do solo e determinante na relação entre área e contato pneu-solo, porém a umidade apesar de ter sua influência, ela não é o único fator determinante entre essa interação, dependendo de outros

atributos, como densidade e as características do rodado e pressão inflação. Segundo Masiero et al. (2011) a pressão de inflação tem papel fundamental na área de contato entre o pneu e o solo, além da distribuição de pressão na sua superfície, sendo que para uma menor compactação do solo e maior eficiência tratorial deve-se ter uma maior área de contato do pneu com o solo, utilizando-se menores pressões de insulflagem dos pneus.

A umidade se mostra um fator determinante na relação entre deformação e área de contato do pneu com o solo, pois nas áreas onde obtivemos flecha ou não, a maior presença de umidade na área, também apresentou maior área de contato.

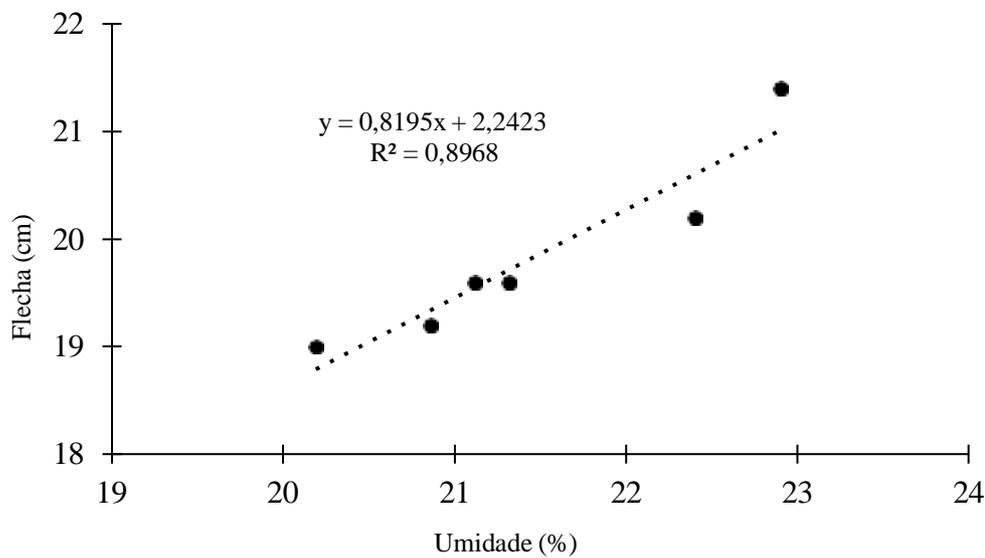


Figura 13 - Relação entre a umidade do solo e a flecha medida, para o pneu dianteiro do Trator PDT

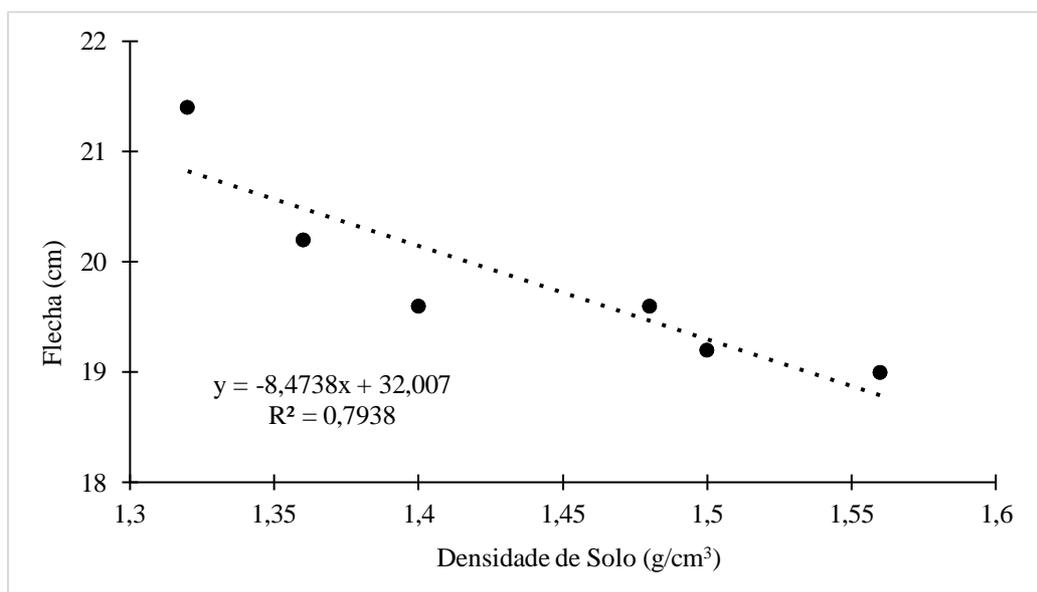


Figura 14 - Relação entre a densidade do solo e a flecha medida, para o pneu dianteiro do

4. CONCLUSÕES

As formas das áreas experimental estão diretamente relacionadas ao teor de umidade presente no solo, influenciando no tamanho e geometria da forma. As formas teóricas apresentaram valores superiores (superestimando) aos obtidos na área experimental.

O teor de umidade do solo é um fator determinante na área de contato, sendo quanto maior o teor de umidade presente no solo, maior a área de contato entre o pneu com o solo.

O aumento da densidade do solo influenciou diretamente na redução da área de contato, apresentando-se como uma das principais variáveis a afetar a relação, pneu/solo área de contato.

Os atributos densidade do solo e umidade estão diretamente relacionados com a deformação do solo, sendo determinantes na utilização da deformação do solo com a metodologia da flecha.

REFERÊNCIAS

- Ampoeter, E. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management*, v.260, p. 1664-1676, 2010.
- Araujo-junior, C. F.; Dias Junior, M. S.; Guimaraes, P. T. G.; Alcântara, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.115-131, 2011.
- Barik, E. L. Aksakal, K. R. Islam, S. Sari, I. Angin, Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations. *Catena*, v.120, p.122-133, 2014.
- Benilaso, I. F.; Mordes, E. E.; Donizete, J. L.; Silva, P. C.; Strini Júnior, A. E. A compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar. In: *Seminário de Tecnologia Agrônômica*, n.6., Piracicaba. Anais... São Paulo: COOPERSUCAR. p.37-66, 1994.
- Bekakos, C. R.; Papazafeiropoulos, G.; O'Boy, D. J.; Prins, J. Finite element modelling of a pneumatic tyre interacting with rigid road and deformable terrain. *Int. J. Vehicle Performance*, V.3, 2017.
- Bygdén, G., L. Eliasson, and I. Wästerlund. Rut depth, soil compaction and rolling resistance

- when using bogie tracks. *Journal of Terramechanics*, v.40. p.179–190, 2004.
- Braunbeck, O.; Oliveira, J. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. *Engenharia Agrícola*, v.26, p.300-308, 2006.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acompanhamento da safra Brasileira. Conab. Disponível em: Acesso em: Junho. 2023.
- D. Wulfsohn, Soil-tire contact area. *Advances in Soil Dynamics*. ASABE, v.3, p.59-84, 2009.
- Davi, F. T. Rigidez do solo na estimativa da área de contato pneu-solo de um trator agrícola. *Engenharia Agrícola*, UFRPE. 2022.
- De Paula, V. R. Avaliação dos danos causados pelo inadvertido tráfego de veículos sobre as soqueiras de cana-de-açúcar. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 2010a.
- Derafshpour, S., Valizadeh, M., Mardani, A., Saray, M. T. A novel system developed based on image processing techniques for dynamical measurement of tire-surface contact area. *Measurement*, v.139, p.270-276, 2019.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. Ministério da Agricultura, Pecuária e 21 Abastecimento. Brasília: Embrapa, 2018.
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Sharifi, A., Shahgholi, G. Potential of three- dimensional footprint mold in investigating the effect of tractor tire contact volume changes on rolling resistance. *Journal of Terramechanics*, v.78, p.63-72, 2018.
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Malvajerdi, A. S., Shahgholi, G. Finite element modeling of the interaction of a treaded tire with clay-loam soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.162, p.793-806, 2019.
- Fernandes, B. B., Marasca, I., Martins, M. B., Sandi, J., Lanças, K. P. Tráfego de máquinas agrícolas e interação dos rodados com dois solos em diferentes teores de água. *Energia na Agricultura*, v.33, p.190-195, 2018.
- Frantz, U. G. Análise de desempenho em tração de rodado simples e duplo em um trator agrícola. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria-RS, 2011.
- Gao, W. Deep roots and soil structure. *Plant, Cell & Environment*, v.39, p.1662-1668, 2016.
- Grechenko, A. Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values. *Journal of Terramechanics*. v.32, p.325-333, 1995.
- Hallonborg, U. Super ellipse as tyre-ground contact area. *Journal of Terramechanics*, v.33, p.125-132, 1996.

- Hamza, M. A.; Al-Adawi, S. S.; Al-Hinai, K. A. Effect of combined soil water and external load on soil compaction. *Soil and Tillage Research*, v.49, p.135-142, 2011a.
- Jadoski, G. S., Pinheiro, T. D., Júnior, P. D. S. S., Rodrigues, F. R. M. Influence of the tyre characteristics on the tractor performance. *Applied Research and Agrotechnology*, v.9, p.115-120, 2016.
- Jales, M. C.; Feitosa, F. A. N.; Koenig, M. L.; Bastos, R. B.; Machado, R. C. A. O Ecossistema recifal de Serrambi (Nordeste do Brasil): Biomassa Fitoplanctônica e Parâmetros Hidrológicos. *Atlântica*, v.2, p.87-102, 2012.
- Janulevicius, A.; Damanauskas, V. How to select air pressures in the tires of MFWD (mechanical front-wheel drive) tractor to minimize fuel consumption for the case of reasonable wheel slip. *Energy*, v.90, p.691-700, 2015.
- Keller, T.; Lamandé, M.; Schjønning, P.; Dexter, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*. v.163, p.13-23, 2011.
- Keller, T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, v.92, p.85-96, 2005.
- Klein, V. A.; Madalosso, T.; Baseggio, M. Ensaio de Proctor normal—análise metodológica e planilha para cálculo da densidade do solo máxima e teor de água ótimo. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v.12, p.199-203, 2014.
- Kumar, S.; Noori, M. T.; Pandey, K. P. Performance characteristics of mode of ballast on energy efficiency indices of agricultural tyre in different terrain condition in controlled soil bin environment. *Energy*, v.182, p.48-56, 2019.
- Kučera, M., Helexa, M., Čedík, J. Link between static radial tire stiffness and the size of its contact surface and contact pressure. *Agronomy Research*, v.14, p.1361-1371, 2016.
- Leite, D. M. Desempenho de um conjunto trator-grade em função da velocidade do trator, pressão interna e tipo de construção dos pneus. 2015. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2015.
- Lima, R. P.; Keller, T. Impact of sample dimensions, soil-cylinder wall friction and elastic properties of soil on stress field and bulk density in uniaxial compression tests. *Soil and Tillage Research*, v.189, p.15-24, 2019.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.812-818, 2010a.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. Compressibilidade de um Argissolo

- Vermelho fisicamente degradado e recuperado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.812-818, 2010b.
- Mazetto, F. R.; Lanças, K. P.; Nagaoka, A. K.; Castro Neto, P.; Guerra, S. P. Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas. *Engenharia Agrícola*, v.24, p.750-757, 2004.
- Masiero, F. C.; Lanças, K. P.; Monteiro L. A. Adequação de conjuntos: Pressão de inflação dos pneus. 2011. Disponível em:< <http://www.nempa.com.br/artigo/adequao-de-conjuntos-presso-deinflao-dos-pneus>> Acesso em: 10 de Maio de 2022.
- Mion, R.; Nascimento, E. S.; Vendas, F.; Silva, S. F.; Duarte, J. M. L.; Sousa, B. M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. *Revista Semina: Ciências Agrárias*, v.33, p.2057-2066, 2012.
- Misiewicz, P. A.; Blackburn, K.; Richards, T. E.; Brighton, J. L.; Godwin, R. J. The evaluation and calibration of pressure mapping system for the measurements of the pressure distribution. *Biosystems Engineering*, v.130, p.81-91, 2015.
- Misiewicz, P. A., Blackburn, K., Richards, T. E., Brighton, J. L., Godwin, R. J. The evaluation and calibration of pressure mapping system for the measurement of the pressure distribution of agricultural tyres. *Biosystems Engineering*, v.130, p.81-91, 2015.
- Mitas. *Agricultural Tires, Technical Databook 13 TH Edition*. Czech Republic. 2013. 15 p.
- Moreira, W. H. et al. Seasonal changes in soil physical properties under long term no-tillage. *Soil and Tillage Research*, v.160, p.53-64, 2016.
- Mossadeghi-Björklund, M.; Jarvis, N.; Larsbo, M.; Forkman, J.; Keller, T. Effects of compaction on soil hydraulic properties, penetration resistance and water flow patterns at the soil profile scale. *Soil Use and Management* v.35, p.367-377, 2019.
- Spagnolo, R. T.; Volpato, C. E. S.; Barbosa, J. A.; Palma, M. A. Z.; Barros, M. M. Fuel consumption of a tractor in function of wear, of ballasting and tire inflation pressure. *Engenharia Agrícola*, v.32, p.131-139, 2012.
- Silva, J. R.; Stolf, R.; Fenner, P. T. Área de contato pneu-solo em trator florestal transportador de alta potência. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, v.36, 2007.