



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

DAVI DE FARIAS THORPE

**RIGIDEZ DO SOLO NA ESTIMATIVA DA ÁREA DE CONTATO
PNEU-SOLO DE UM TRATOR AGRÍCOLA**

RECIFE – PE

2022

DAVI DE FARIAS THORPE

**RIGIDEZ DO SOLO NA ESTIMATIVA DA ÁREA DE CONTATO
PNEU-SOLO DE UM TRATOR AGRÍCOLA**

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

Orientador: Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

RECIFE – PE

2022

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)

T518r

Thorpe, Davi de Farias
RIGIDEZ DO SOLO NA ESTIMATIVA DA ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO DE UM TRATOR
AGRÍCOLA / Davi de Farias Thorpe. - 2022.
46 f. : il.

Orientador: Davi de Farias Thorpe.
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2022.

1. compactação do solo. 2. tensões no solo. 3. máquinas agrícolas. 4. relação pneu-solo. I. Thorpe, Davi de Farias, orient. II. Título

CDD 630

DAVI DE FARIAS THORPE

RIGIDEZ DO SOLO NA ESTIMATIVA DA ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO
DE UM TRATOR AGRÍCOLA

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

DEFENDIDA em 31 de março de 2022.

Orientador:

Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim (UFRPE)

Examinadores:

Prof. Dr. Djalma Euzébio Simões (UFRPE)

Dr. Renato Paiva de Lima (UFRPE)

Prof. Dr. Maurício Javier de Leon (UFPB)

RECIFE - PE

2022

AGRADECIMENTOS

A FACEPE, Capes e CNPq por acreditar no projeto de pesquisa, pela oportunidade da bolsa, a qual me ajudou muito durante esse período de pandemia. Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela excelente estrutura, pelos professores que transmitiram seu conhecimento.

A minha família pelo apoio durante toda minha vida e principalmente nesse momento tão importante, em especial ao meu pai Wandercio, minha mãe Valdelice e meu irmão Lucas. Sem o suporte deles nada disso seria possível.

Aos meus amigos da graduação Francisco e Camila, e amigos que fiz durante a pós Sirleide, Catiana e especialmente Carolayne, que me ajudaram durante todas as etapas dessa jornada. Aos trabalhadores da EECAC, Evanilson, Jean, Jeferson e Seu Lula, por toda a ajuda e suporte que deram nas atividades de campo.

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

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão desse mestrado, sem dúvidas irei levar todos comigo para o resto da vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS.....	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 PNEU DE VEÍCULOS AGRÍCOLAS E ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO	3
2.2 ÁREA DE CONTATO	3
2.3 CARACTERÍSTICAS DO SOLO	4
2.4 CARACTERÍSTICAS DO PNEU	5
2.5 MODELAGEM DA ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO	8
2.5.1 Modelos para superfície rígida	8
2.5.2 Modelos teóricos em superfícies deformáveis.....	10
2.6 RIGIDEZ DO SOLO.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	16
3.2 CENÁRIOS EXPERIMENTAIS	16
3.3 CARACTERÍSTICAS DO TRATOR UTILIZADO	18
3.4 COLETA DE AMOSTRAS	20
3.5 DENSIDADE E UMIDADE DO SOLO	20
3.6 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	21
3.7 MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DA ÁREA DE CONTATO.....	22
3.8 ESTIMATIVA TEÓRICA DA ÁREA DE CONTATO	23
3.9 ANÁLISE DOS DADOS	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
5. CONCLUSÕES.....	32
6. REFERÊNCIAS.....	33

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DEFORMAÇÃO DO PNEU EM SUPERFÍCIE RÍGIDA. ADAPTADO DE SHARMA; PANDEY, 1996.....	9
FIGURA 2. GEOMETRIA DA ÁREA DE CONTATO. ADAPTADO DE SHARMA; PANDEY, 1996.	10
FIGURA 3. EXEMPLO DE FORMAS QUE A SUPER-ELÍPSE PODE ASSUMIR.....	13
FIGURA 4. SOLO AGRÍCOLA PREPARADO (SAP).....	16
FIGURA 5. SOLO AGRÍCOLA CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR (SAC).	17
FIGURA 6. ESTRADA VICINAL COMPACTADA	17
FIGURA 7. SUPERFÍCIE DE CONCRETO SIMPLES (SCS)	18
FIGURA 8. PNEU DIANTEIRO DE REBOQUE (PDR), PNEU DIANTEIRO DE TRATOR (PDT) E PNEU TRASEIRO DE TRATOR (PTT)..	19
FIGURA 9. AMOSTRADOR UHLAND (A) E ANEL VOLUMÉTRICO (B).....	20
FIGURA 10. PENETRÔMETRO MANUAL MODELO STOLF.....	21
FIGURA 11. ÁREA FOTOGRAFADA SUPERFÍCIE DE CONTATO PNEU-SOLO DENTRO DO QUADRO UTILIZADO PARA DELIMITAÇÃO EXPERIMENTAL DA ÁREA.	22
FIGURA 12. RELAÇÃO ENTRE ÁREA DE CONTATO E A DENSIDADE DA SUPERFÍCIE, PARA O PNEU DIANTEIRO DE REBOQUE (PDR), PNEU DIANTEIRO DE TRATOR (PDT) E PNEU TRASEIRO DE TRATOR (PTT).....	26
FIGURA 13. RELAÇÃO ENTRE ÁREA DE CONTATO E O TEOR DE UMIDADE DO SOLO, PARA O PNEU DIANTEIRO DE REBOQUE (PDR), PNEU DIANTEIRO DE TRATOR (PDT) E PNEU TRASEIRO DE TRATOR (PTT).....	27
FIGURA 14. FORMATO DA ÁREA DE CONTATO EM UMA ESCALA QUALITATIVA DE RIGIDEZ DO SOLO, BASEADA NA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RSP), OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E PELO MODELO TEÓRICO, PARA O PNEU DIANTEIRO DO REBOQUE (PDR), PNEU DIANTEIRO DE TRATOR (PDT) E PNEU TRASEIRO DE TRATOR (PTT), NAS ÁREAS COM SOLO AGRÍCOLA PREPARADO (SAP), SOLO AGRÍCOLA CULTIVADO (SAC), ESTRADA VICINAL COMPACTADA (EVC) E SUPERFÍCIE DE CONCRETO SIMPLES (SCS).	29
FIGURA 15. SOBREPOSIÇÃO DAS FORMAS DA ÁREA DE CONTATO, OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E PELO MODELO TEÓRICO, DO PNEU DIANTEIRO DE REBOQUE (PDR), PNEU DIANTEIRO DE TRATOR (PDT) E PNEU TRASEIRO DE TRATOR (PTT), NAS ÁREAS COM SOLO AGRÍCOLA PREPARADO (SAP), SOLO AGRÍCOLA CULTIVADO (SAC), ESTRADA VICINAL COMPACTADA (EVC) E SUPERFÍCIE DE CONCRETO SIMPLES (SCS).....	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS UTILIZADAS.....	18
TABELA 2. CARACTERÍSTICAS DOS PNEUS UTILIZADOS.	19
TABELA 3. MÉDIAS E DESVIO PADRÃO* DAS ÁREAS DE CONTATO EXPERIMENTAIS E TEÓRICA, DE CADA PNEU AVALIADO.....	24

RESUMO

A estimativa da área de contato auxilia na determinação da pressão de contato, a relação tensão-deformação e o risco potencial de compactação, portanto é fundamental conhecer a forma e o tamanho da área de contato pneu-solo. Algumas características podem alterar a área de contato pneu-solo variando em função do tipo de pneu, tamanho, pressão de insuflagem e carga sobre o eixo, assim como, variam em função de características do solo como a textura, umidade, e resistência a deformação; entretanto, nem todas essas características são levadas em consideração nos modelos para obter a área de contato. Objetivou-se avaliar a influência da rigidez de superfícies agrícolas na área de contato pneu-solo de um trator agrícola. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina, Carpina-PE. Foram selecionadas quatro áreas de acordo com os níveis de rigidez de suas superfícies, a saber: um solo agrícola após o preparo, um solo cultivado com cana-de-açúcar após nove colheitas, uma estrada vicinal compactada e uma superfície de concreto simples. A área de contato de três pneus distintos foi determinada de modo experimental por meio da análise de imagem fotográfica e de forma teórica pelo modelo da super-elipse. A área teórica obtida superestimou a de forma experimental. A área de contato apresentou uma relação inversamente proporcional à densidade e diretamente proporcional ao teor de umidade do solo. A forma da área de contato não sofreu grandes variações nos pneus do eixo dianteiro, entretanto o pneu traseiro apresentou grande variação. As formas experimentais da área de contato se aproximaram da teórica no cenário com maior teor de umidade. Concluiu-se que a rigidez da superfície reduziu o tamanho e alterou o formato da área de contato; o modelo da super-elipse pode superestimar o tamanho da área de contato real em até 2 vezes. O teor de umidade foi determinante sobre o formato e tamanho da área de contato.

Palavras-chave: compactação do solo; tensões no solo; máquinas agrícolas; relação pneu-solo

ABSTRACT

The estimation of the contact area assists in determining the contact pressure, the stress-strain relationship, and the potential risk of compaction; therefore, it is essential to know the shape and size of the tire-ground contact area. Some characteristics can change the tire-ground contact area, depending on the tire type, size, inflation pressure and axle load, as well as depending on soil characteristics such as texture, moisture, and resistance to deformation; however, not all these characteristics are considered in the models to obtain the contact area. The objective was to evaluate the influence of the stiffness of agricultural surfaces on the tire-soil contact area of an agricultural tractor. The study was carried out at the Carpina Sugarcane Experimental Station, Carpina-PE. Four areas were selected according to the levels of rigidity of their surfaces, namely: an agricultural soil after preparation, a soil cultivated with sugarcane after nine harvests, a compacted side road and a simple concrete surface. The contact area of three different tires was experimentally determined by means of photographic image analysis and theoretically by the super-ellipse model. The theoretical area overestimated that obtained experimentally. The contact area showed an inversely proportional relationship to the density and directly proportional to the soil moisture content. The shape of the contact area did not suffer great variations in the tires of the front axle, however the rear tire presented great variation. The experimental shapes of the contact area approached the theoretical in the scenario with higher moisture content. It was concluded that surface stiffness reduced the size and changed the shape of the contact area; the super-ellipse model can overestimate the size of the actual contact area by up to 2 times. The moisture content was determinant on the shape and size of the contact area.

Keywords: soil compression; soil tensions; agricultural machinery; tire-soil relationship.

INTRODUÇÃO

O pneu agrícola é o elemento de transição entre a máquina e o terreno, através dele se transmite todo peso da máquina ao terreno, gerando uma tensão distribuída na área de contato formada na interação pneu-solo.

Como as tensões provocadas pelas máquinas são distribuídas dentro da área de contato, entender como a área de contato é gerada auxilia em uma estimativa da deformação e compactação do solo mais acurada. Uma área de contato grande permite que a carga do pneu seja distribuída de forma ampla pelo solo, permite um aumento na tração do veículo e uma redução no combustível consumido.

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.

A área de contato pode ser obtida experimentalmente de diversas maneiras, sendo o método de utilizar uma fotografia do contato e processá-la em um software de computador, uma metodologia atestada e precisa. Outros meios consistem em utilizar algum produto para marcar o pneu na superfície e utilizar papel milimetrado para encontrar a área demarcada.

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para estimar a área de contato em superfícies rígidas e deformáveis. Várias formas geométricas equivalentes para área de contato foram desenvolvidas ao longo dos anos, variando entre círculo, retângulo, elipse e super-elipse. Entretanto, em geral, esses modelos não utilizam parâmetros da superfície como um fator capaz de alterar a área de contato.

A rigidez do solo pode ser definida como a resistência do solo à deformação, e é uma importante propriedade que influencia diversos resultados no meio agrícola. A rigidez pode afetar fatores como o crescimento das raízes, fixação da cultura, compactação do solo, erosão e a interação do solo com máquinas agrícolas.

A densidade, umidade e resistência a penetração do solo são parâmetros comumente associado a rigidez do solo, e estão diretamente relacionadas ao aumento do estado de compactação. A relação da rigidez com variações na área de contato ainda não é plenamente utilizada nos cálculos de área.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

O objetivo desse estudo foi avaliar a influência da rigidez de superfícies agrícolas e de tráfego na área de contato pneu-solo de um trator agrícola.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar experimentalmente a área de contato dos pneus de um trator em superfície rígida e deformável;
- Verificar o efeito da densidade, teor de umidade e resistência a penetração, como parâmetros de rigidez do solo, na variação da área de contato pneu-solo;
- Comparar os resultados obtidos nas áreas teórica e experimental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pneu de veículos agrícolas e área de contato pneu-solo

Os pneus agrícolas são um dos componentes mais importantes do maquinário agrícola, pois são responsáveis pela sustentação, equilíbrio, deslocamento, direcionamento e realização do esforço do trator, sendo o ponto de contato entre a máquina e o solo. A capacidade de fornecer potência para tracionar implementos e realizar satisfatoriamente as operações agrícolas depende da configuração do rodado que equipa a máquina, além disso, também podem influenciar na compactação do solo (SHULMAN, 2019; FARHADI et al., 2018).

Segundo Bockstal et al. (2019), existem 7 partes principais na composição do pneu, a saber:

- A banda de rodagem, que fica em contato direto com a superfície e permite diferentes movimentos do veículo, é composta por borrachas.
- Os cintos, que podem ser feitos de diversos materiais como borracha, aço e partes têxteis de acordo com o uso, fornecendo o suporte para a camada externa,
- As paredes laterais mantêm o pneu em contato com o aro, que são feitas de borracha e projetadas para suportar os solavancos da estrada, mantendo a integridade da estrutura do pneu,
- A carcaça que fornece a estrutura interna do pneu, feita de fios torcidos de metal ou polímero revestidos com borracha natural.
- O revestimento interno mantém o ar contido em alta pressão e oferece boa resistência ao rolamento, é composto de uma borracha especial com baixa permeabilidade ao ar.
- O talão garante uma conexão entre o pneu e o aro da roda, enquanto o encordoamento do talão proporciona uma transição entre a carcaça.
- O revestimento interno, são feitos de metal e fio de aço revestido de ligas de alta resistência à tração envolto em borracha.

2.2 Área de contato

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 (SANDU et al., 2019). A “Área de contato estática” é a superfície de contato entre o pneu e uma peça rígida ou superfície deformável, quando o pneu é carregado estaticamente, sem estar em movimento.

Estudar as interações pneu-solo, especialmente em terras agrícolas, é desafiador porque a deformação vertical do solo às vezes é maior que a dos pneus. Para simular a deformação do pneu no solo, a tensão e a deformação do solo precisam ser caracterizadas. Além disso, a dinâmica e a cinemática dos pneus em terrenos deformáveis são afetados por diferentes fatores de design e operação, bem como pelas características do terreno. (UNGUREANU et al., 2016; SANDU et al., 2019).

A estimativa da área de contato ajuda a determinar a pressão de contato, a relação tensão-deformação e o risco potencial de compactação. 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, a área de contato se torna maior e há uma redução na resistência ao rolamento e no combustível consumido (PARKHOMENKO et al., 2019).

Determinar a forma e o tamanho da área de contato é especialmente importante para veículos automotores, tratores e máquinas agrícolas; para isso, é necessário entender quais fatores afetam a área de contato. Esses fatores podem ser divididos em dois grupos: “características do solo” e “características do pneu”.

2.3 Características do solo

Quando as máquinas trafegam, uma pressão externa é aplicada sobre a superfície de forma que, verifica-se uma nova acomodação das partículas, reduzindo o espaço poroso do solo, promovendo um acréscimo de densidade e da resistência à penetração e, como consequência, aumento da compactação (MARUSIAK; NERUDA, 2018).

Outro fator que altera o funcionamento compressivo do solo é o teor e o tipo de argila, alterando a área de contato entre o pneu e o solo. Quanto maior o teor de argila, maior a profundidade que a pressão é transmitida e maior é a área de contato (SAVIOLE et al., 2020). A dependência do pneu e da área de contato com o solo nas deformações elásticas da roda e nas deformações elásto-plásticas do solo é considerada um problema no cálculo das pressões de contato do veículo (MARUSIAK; NERUDA, 2018).

Zemolim et al. (2017), avaliaram a relação entre 3 pressões de insuflagem e 3 solos com texturas distintas, arenosa, textura argilosa e textura média. Puderam verificar que a

textura média obteve piores índices de área de contato com o solo (áreas menores), mesmo variando a pressão nos pneus, mostrando-se distinta as outras texturas analisadas.

Como visto em Söhne (1953), a distribuição das tensões sobre a área de contato depende da rigidez do solo. Um dos parâmetros físicos mais simples, que caracteriza a rigidez do solo, é a densidade e a resistência à penetração do solo, que estão diretamente relacionados ao aumento do estado de compactação, e, portanto, o solo se torna mais rígido e resistente à medida que a densidade e a resistência aumentam (NOVAK et al., 2017).

A umidade do solo também é um fator determinante para a forma e o tamanho da área de contato. A aplicação de cargas dinâmicas no solo por rodas agrícolas gera tensão na interface pneu-solo, dependendo do teor de umidade do solo e do número de repetições dessas cargas (REN et al., 2019).

Como observado por Fernandes et al. (2018), que estudaram o efeito de diferentes teores de umidade e níveis de pressão dos pneus sobre a área de contato e deformação do solo, em dois solos distintos, concluíram que quanto maior o teor de água no solo, maior a área de contato e a deformação do solo.

O conteúdo de água no solo também exerce uma relação indireta com a rigidez, pois age como lubrificante ao redor das partículas e reduz a coesão entre partículas. De um modo geral, a rigidez do solo está relacionada ao conteúdo de água no solo, a granulometria e a mineralogia (GENRO JUNIOR et al., 2004).

As interações entre o solo e as rodas das máquinas, resultam em um esforço de tração e uma resistência ao rolamento. A resistência ao rolamento, devido a uma baixa aderência do pneu restringe a movimentação de máquinas agrícolas em solos não estruturados (JIANG et al, 2020). A área de contato e a resistência ao rolamento possuem uma relação inversamente proporcional, onde o uso de pneus com maior largura da banda de rodagem, ou até mesmo com a utilização de menor pressão de inflação e lateral mais flexível, o que gera uma área de contato maior, resulta em uma redução da resistência ao rolamento e o consumo de combustível (DISERENS, 2009).

2.4 Características do pneu

Considerando a forma estrutural, têm-se três tipos de pneus agrícolas: os baixa pressão e alta flutuação, 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 do que outros tipos de pneus, e não podem ser reformados, portanto, o custo de compra é mais elevado (SHULMAN, 2019; BOCKSTAL et al., 2019).

Os pneus radiais, desenvolvidos em meados dos anos 40, 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). Apresentam flexibilidade maior no costado, se comparado aos pneus diagonais, e combinado com as cintas para rigidez, promovem um melhor desempenho de tração e aumentam a eficiência. Devido a essa rigidez, a área de contato desse pneu tende a ter uma forma semelhante à de um retângulo (da SILVA et al., 2017). E sua principal vantagem é a alta estabilidade dimensional, o que impede que a carcaça sofra deformações permanentes ou sérias. Dessa forma, possui uma maior durabilidade que o diagonal, contribuindo para que haja uma maior economia ao longo do tempo (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). Atualmente, esses pneus são feitos com lonas de nylon, de modo que suas principais qualidades são o potencial maior de resistência aos impactos, a vida útil muito longa, bem como a alta elasticidade. A forma da área de contato do pneu diagonal tende a apresentar uma forma semelhante à de uma elipse (CZARNECKI et al., 2019).

Machado et al. (2014), avaliaram dois tipos construtivos de pneus, sendo um diagonal e o outro radial, utilizando as seguintes variáveis: área de contato entre o pneu e uma superfície rígida e as deformações elásticas. Eles concluíram que de um modo geral o pneu diagonal apresenta área de contato 27% menor que o radial, considerando todas as cargas aplicadas.

Kumar et al. (2018) avaliaram a deflexão vertical e a área de contato de pneus diagonal e radial em diferentes condições de lastro com cinco cargas normais. Os dados

combinados dos pneus radial e diagonal revelam que o pneu diagonal apresenta menor área de contato quando submetido a lastro de ferro e lastro com líquido.

A pressão de insuflagem do pneu é o fator mais fácil e rápido de alterar. Afeta diretamente a área de contato pneu-solo e a pressão sobre o solo, o que, por sua vez, afeta a tensão do solo e sua distribuição. 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. Jadoski et al. (2016), relataram que a combinação de fatores de pressão de calibração de pneus, como tipo de pneus e lastro do trator, pode influenciar positiva ou negativamente sua patinagem e a resistência ao rolamento, desempenho operacional, vida útil do pneu e consumo de combustível.

A área de contato com a superfície, pode ser aumentada diminuindo a pressão de inflação dentro do pneu, ou seja, aumentando a deflexão vertical, o que pode ser obtido adicionando algum peso extra de lastro ao pneu. Essa distribuição de pressão e da área de contato é fundamental para minimizar os efeitos da compactação (JADOSKI et al., 2016).

A carga sobre o eixo do pneu também deve ser levada em consideração ao avaliar a área de contato pneu-solo. A distribuição das tensões provocadas por rodados das máquinas agrícolas influencia no rendimento, na eficiência do trator, e no consumo de combustível. Para determinar essa tensão no solo a carga total aplicada por roda, é dividida pela área de contato entre o solo e o pneu (KENARSARI; VITTON; BEARD, 2018). Cada tipo de pneu irá apresentar uma carga de modo particular e com tensão de contato característica.

Antunes Júnior et al. (2017), avaliaram a área de contato e patinagem dos rodados, em um Latossolo sob semeadura direta, com um trator submetido a diferentes forças na barra de tração e a dois tipos de cobertura do solo. Concluíram que a cobertura vegetal proporcionou área de contato maior. Visto que o solo com cobertura vegetal ocasionou áreas de contato em média 33% maior em comparação a área de solo sem cobertura vegetal e, na maior carga, a área de contato foi de 0,15 e 0,25 m² para o solo sem e com cobertura, respectivamente. Ou seja, na maior carga imposta, o solo com cobertura proporcionou uma área de contato 40% maior que o solo sem cobertura.

A rigidez do pneu pode ser interpretada como sendo a capacidade de suportar uma força sem sofrer uma deflexão. Os fatores que têm um grande efeito sobre a rigidez são a pressão de insuflagem, largura da seção do pneu, diâmetro do aro e a idade do pneu. Assim ao sofrer uma determinada deflexão, o pneu entra em contato com uma porção maior de solo, o que conseqüentemente aumenta a área de contato (FARHADI et al., 2018; DISERENS et al., 2011). A rigidez de um pneu rolante é geralmente menor que a de um pneu estacionário.

Essa rigidez tende a diminuir significativamente com o aumento da velocidade para faixa de baixa velocidade ($<10 \text{ km.h}^{-1}$). Para faixas de velocidade mais altas, a rigidez não varia significativamente (DISERENS et al., 2011).

2.5 Modelagem da área de contato pneu-solo

Em conjunto com os fatores citados, diversas teorias e pressupostos foram admitidos para criação de modelos que fossem capazes de estimar a área de contato, em superfícies rígidas e deformáveis.

2.5.1 Modelos para superfície rígida

Uma superfície rígida, é um plano teórico com um módulo de elasticidade extremamente alto (SAARILAHTI, 2002). Seguindo essa afirmação Bekker (1956) assumiu um pneu pneumático de formato uniforme sem carga, submetido a uma tensão agindo na direção do meridiano. Supondo que o pneu esteja em uma superfície rígida sob uma carga, e a deflexão não causa nenhuma mudança na circunferência da seção transversal do pneu, foi considerado que a área de contato com o solo é um retângulo com dimensões $2l \times b'$ reduzido em 15% (Equação 1). Sendo l o comprimento da área de contato e b' a deflexão do pneu.

$$A = 1,7lb' \quad (1)$$

Upadhyaya e Wulfsohn (1990) descreveram a área de contato do pneu sob condições estáticas como uma elipse com eixo principal c/b e eixo menor c (Equação 2). Onde c e b são funções do raio geral do pneu, raio da banda de rodagem e deflexão do pneu quando submetido a carga por eixo.

$$\frac{x^2}{c^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{c}{b}\right)^2} = 1 \quad (2)$$

Se o valor de c for maior que a metade da largura da banda de rodagem (W), a área de contato será retangular com bordas curvas (Figura 1) e representada como (Equação 3):

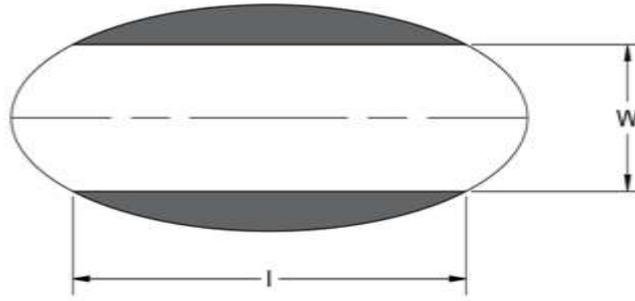


Figura 1. Deformação do pneu em superfície rígida. Adaptado de Sharma; Pandey, 1996.

$$A = \frac{lb}{4}(\pi - 2n) \quad (3)$$

Onde l é o comprimento da área de contato, b a largura, e n é determinado por (Equação 4):

$$n = \left[\left\{ 2 \left(1 - \frac{w}{b} \right)^{1/2} - \left(\frac{w}{b} \right) \{ 1 - (w/b)^2 \}^{1/2} \right\} \right] \quad (4)$$

Godbole, Alcock e Hettiaratchi (1993) assumiram que a área de contato entre o pneu e superfície rígida pode gerar formas elípticas e retangulares. Assumindo uma superfície rígida (Figura 2) onde B é a largura, D é o diâmetro, h é a altura da seção do pneu, f é a deflexão do pneu, l é o comprimento da área de contato e b a largura da área de contato.

A área do elipsoide (Equação 5) é representada por:

$$A = \frac{\pi lb}{4} \quad (5)$$

Se o $D \gg f$, então a área pode ser considerada retangular (Equação 6):

$$A = 4f\sqrt{Dh} \quad (6)$$

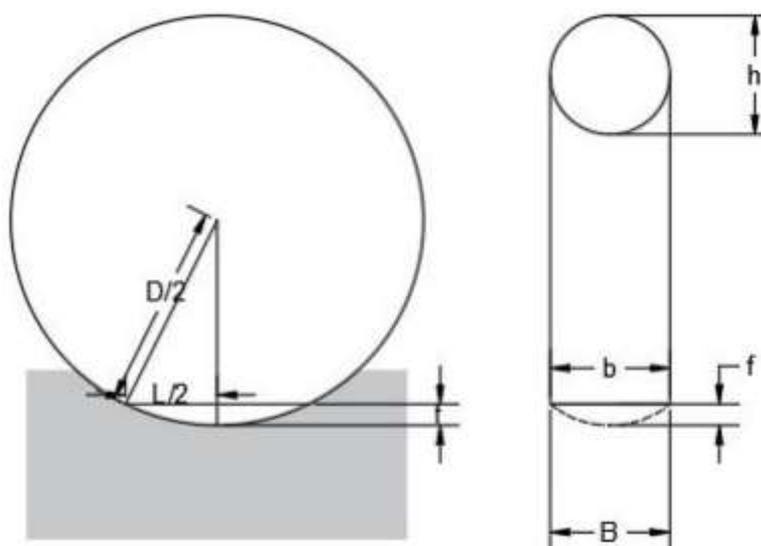


Figura 2. Geometria da área de contato. Adaptado de Sharma; Pandey, 1996.

Os resultados mostraram que a forma retangular deu valores mais elevados para a área de contato do que a forma elíptica, o que confirma a redução na área retangular prevista por Bekker (1956).

A mecânica dos pavimentos, admite que essas áreas sejam aproximadas a área de um círculo, de modo a facilitar os cálculos (MEDINA, 1997). Nesse caso, a tensão de contato é aproximadamente igual à pressão de insuflagem dos pneus, sendo a diferença desprezível para efeito do dimensionamento.

2.5.2 Modelos teóricos em superfícies deformáveis

Uma superfície deformável é um meio com deformações elásticas e/ou plásticas (SAARILAHTI, 2002). Diversas teorias foram desenvolvidas para medir a área de contato de um pneu com o solo por meio de diferentes métodos. Algumas dessas teorias são baseadas na equação de Boussinesq, que descreve a propagação de tensões sob cargas pontuais atuando em um meio semi-infinito, elástico idealmente homogêneo, e isotrópico. No entanto, essas condições representam uma imagem do solo muito idealizada (SHARMA; PANDEY, 1996).

Outros métodos são baseados na teoria de contato Hertz (JOHNSON, 1982), que utiliza sistemas de coordenadas cartesianas, coeficientes elípticos de área de contato e medições incrementais de comprimento de arco de perfis de contato (SHARMA; PANDEY, 1996).

Um dos primeiros a aplicar a teoria de Boussinesq aos solos agrícolas foi Söhne (1953), acrescentando um fator de concentração empírico para explicar o comportamento não ideal. Uma das vantagens desta abordagem é que os cálculos são relativamente simples, mas existem algumas limitações devido às suposições simplificadas utilizadas em seu desenvolvimento.

Devido aos pressupostos considerados (meio homogêneo e semi-infinito), a equação de Söhne (1953) não é capaz de estimar a tensão em solos com camada superficial solta cobrindo um subsolo denso, situação comum na agricultura. Essa falha muitas vezes resulta em uma subestimação da compactação de veículos pesados em solos estratificados.

Yong et al. (1980) previram a área de contato do pneu com o solo utilizando a solução de contato de dois cilindros proposta por Poritsky (1950) para a teoria do contato de Hertz entre dois corpos elásticos (Equação 7). Com base nesta abordagem:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{4W}{\pi \left(\frac{l}{2}\right)^2} \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right] \quad (7)$$

Onde o pneu é idealizado como um cilindro de raio “ R_1 ”, o solo como um cilindro de raio infinito “ R_2 ”, W é a carga vertical, l é o comprimento da área de contato, ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson e E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade do cilindro. A área de contato da interface pneu-solo foi, portanto, aproximada para ser retangular, de comprimento l com suposições para ν_1 e E_2 (YONG et al., 1980).

Foram incorporados ao programa de computador desenvolvido para o cálculo da área de contato 3 suposições: o coeficiente de Poisson (ν) do solo, a relação entre a mudança na largura e comprimento da área de contato, e a largura da área de contato no solo igual à de uma superfície rígida (YONG et al., 1980).

Os limites geométricos da área de contato são fundamentais para a precisão da aplicação e distribuição da tensão em pneus agrícolas, afetando o desempenho do modelo de compactação (DERAFSHPOUR et al., 2019). Assim, o formato da área de contato é utilizado como parte intrínseca dos modelos de compactação do solo.

Gupta e Larson (1982) desenvolveram um modelo de compactação do solo bidimensional, onde a tensão é calculada em um plano vertical paralelo ao transversal ou longitudinal ao eixo do pneu, e para tal utilizaram uma forma elíptica para área de contato.

O modelo apresentado por Johnson e Burt (1990) é um modelo analítico bidimensional, ou seja, a propagação da tensão no solo ocorre da mesma maneira que no de

Gupta e Larson (1982), entretanto, foi considerado uma forma retangular para área de contato.

Com o objetivo de ser um procedimento simples e de fácil utilização, O'Sullivan et al. (1999) apresentaram o “Compsoil”, um modelo de compactação de solo que se destina ao uso por não especialistas. Ele é estruturado em três etapas principais, primeiramente, são modeladas as forças aplicadas pelo veículo na superfície do solo. Primeiro ele determina a área de contato entre a roda e o solo e, em seguida, distribui a carga sobre essa área de uma maneira apropriada. O modelo então usa um método analítico para estimar como as tensões se propagam pelo solo. No terceiro componente, valores de parâmetro de solo apropriados são selecionados para descrever o efeito do estresse na mudança de volume do solo.

A estimativa da área de contato é realizada levando em consideração características como o tamanho do pneu, a pressão de inflação e a carga; e parâmetros para um solo rígido e solto, entretanto esse parâmetro afeta apenas o tamanho da área. Após a obtenção da área, o modelo considera uma forma circular equivalente (O'SULLIVAN et al., 1999).

Hallonborg (1996) apresentou um modelo matemático (Equação 8), onde a forma da área de contato é representada por uma super-elipse. A super-elipse pode assumir uma grande variedade de formas, desde uma elipse, um retângulo com bordas arredondadas, até um retângulo (Figura 3).

$$\left| \frac{x}{a} \right|^n + \left| \frac{y}{b} \right|^n = 1 \quad (8)$$

O uso da super-elipse na área de contato do pneu com o solo fornece um modelo flexível fácil de ajustar a quase todas as condições do pneu com o solo, especialmente para pneus largos de trator de perfil baixo em solo macio. O modelo pode lidar com áreas de contato que são assimétricas tanto longitudinalmente quanto lateralmente e fornece coordenadas explícitas para qualquer ponto em um limite de área de contato avaliado e, portanto, facilita a integração, por exemplo, da distribuição da pressão sobre o solo (HALLONBORG, 1996).

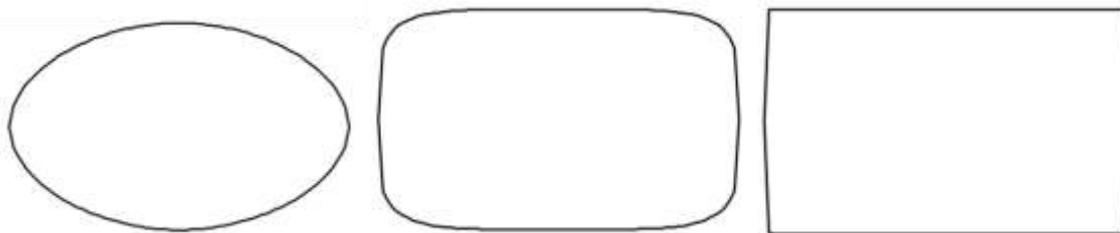


Figura 3. Exemplo de formas que a super-elipse pode assumir.

O modelo de compactação do solo “SOCOMO” foi desenvolvido para calcular se o subsolo será sobrecarregado por uma carga de roda específica. Isso permite calcular a carga de roda admissível, levando em conta o tamanho do pneu, pressão de inflação e a resistência do solo, que dependem da textura e estrutura do solo, densidade aparente e condições de umidade. Durante o processamento da distribuição de tensão a área de contato é representada por um plano horizontal retangular e as tensões são distribuídas uniformemente nesse plano (van den Akker, 2004).

Uma análise dos modelos de Gupta e Larson (1982), Johnson e Burt (1990), O'Sullivan et al. (1999) e van den Akker (2004) evidencia que cada um apresenta limitações. Alguns deles levam em consideração a tensão de cisalhamento na superfície do solo, outros não. A distribuição da tensão sobre a área de contato é descrita de formas muito diferentes (KELLER et al., 2007).

Levando em consideração essas limitações Keller et al. (2007) desenvolveram o “SoilFlex”, um modelo que permite uma estimativa realista da área de contato e a distribuição de tensão na área de contato a partir de parâmetros de pneus prontamente disponíveis. O modelo é baseado em equações analíticas para propagação de tensões e utiliza a super-elipse para definir a forma da área de contato, permitindo simular a passagem de várias combinações de máquinas, bem como diferentes configurações de rodas.

Sua precisão está relacionada às várias relações tensão-deformação que descrevem o comportamento compressivo dos solos agrícolas incorporados ao modelo, com cada incremento de deformação permanecendo pequeno à medida que a carga é aplicada gradualmente. O modelo também inclui duas opções para calcular o deslocamento vertical e a profundidade do sulco, apenas o volume de deformação ou volume e tensões de cisalhamento (KELLER et al., 2007).

Existem dois modelos de compactação mais recentes, um denominado de “FRIDA”, que utiliza como base o próprio Soilflex, e o outro denominado de “Terranimo”, que utiliza o FRIDA como base, buscando aprimorar a quantificação da área de contato, bem como a

distribuição de tensão ao longo da área com mais detalhes. Devido as suas bases, esses modelos também utilizam a super-elipse como forma da área de contato (SCHJØNNING et al., 2008; STETTLER et al., 2014).

A super-elipse, até então, é considerada como uma boa representação aproximada da forma da área de contato (ROŞCA et al., 2014), e a evolução desses modelos contribuiu para o aumento da acurácia na estimativa da área de contato. Os modelos recentes, baseados na super-elipse, apresentam uma maior fidelidade da interação pneu-solo.

Em geral, a aplicabilidade desses modelos e equações são limitados por necessitarem de medições no local complementares para estimar com precisão a área de contato, não são suficientemente precisos devido à falta de variáveis importantes, dão resultados satisfatórios apenas para uma faixa estreita de pneus definidos, ou são aplicáveis com variáveis incomuns sob condições de solo indefinidas (DISERENS et al, 2011).

2.6 Rigidez do solo

A rigidez do solo é uma propriedade influente na determinação dos resultados agrícolas e geotécnicos. Ela pode ser definida como a resistência do solo à deformação, e afeta diversos fatores como o crescimento das raízes, fixação das culturas contra falhas biomecânicas, compactação do solo, friabilidade, suscetibilidade à erosão, desenvolvimento de perigos geofísicos naturais e interações do solo com ferramentas e máquinas (WANG et al., 2005; HORABIK; JOZEFACIUK, 2021).

A rigidez do solo é resultado da estrutura do solo e das forças de interação entre os componentes do solo. Portanto, essa rigidez é um produto da composição mineralógica e granulométrica heterogênea e alta diversidade de matéria orgânica, além de fatores externos, como tensões aplicadas sobre esse solo (HORABIK; JOZEFACIUK, 2021). Como as interações de diferentes componentes do solo podem ter efeitos sinérgicos ou antagônicos, investigar as interações entre os componentes individuais daria uma visão mais precisa, por outro lado, essa investigação individual se torna muito complexa (WANG et al., 2005).

O processo de compactação está diretamente ligado ao aumento da rigidez do solo, pois ele é responsável por reduzir os vazios do solo, aumentar resistência do solo e reduzir a permeabilidade. Através da compactação, a massa torna-se mais uniforme e a densidade específica aparente do solo aumenta à medida que os vazios diminuem (YUE et al., 2021).

A densidade do solo é um dos parâmetros mais utilizados para identificar a compactação do solo (VALLE et al., 2018). Embora não possa representar efetivamente a função do sistema de poros, pois relaciona a massa seca do solo a um volume definido, é

amplamente utilizado para classificar o estado de compactação do solo por ser relativamente fácil de medir (DÖRNER et al., 2022).

A resistência do solo à penetração é utilizada como indicador de compactação do solo, pois está diretamente relacionada ao desenvolvimento das plantas e é mais eficaz na identificação dos estados de compactação do que a densidade do solo (SILVA et al., 2003).

Uma maneira rápida e fácil de medir a resistência à penetração em diferentes profundidades é o uso de um penetrômetro, dispositivo amplamente utilizado para correlacionar os fatores de resistência do solo com o alongamento das raízes. O princípio do penetrômetro é baseado na resistência do solo à penetração da haste, quando a força é aplicada na parte superior da haste, a distância é conhecida (STOLF, 1991).

Como apresentado anteriormente, os modelos mais utilizados levam em consideração apenas variáveis relacionadas ao pneu, e utilizam formulações distintas para uma superfície rígida ou deformável, porém o grau de rigidez da superfície aparenta ser uma variável importante. Assim, utilizar a variável rigidez do solo como um parâmetro determinante da área de contato pneu-solo pode resultar em maior acurácia para os modelos matemáticos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido durante os meses de agosto a outubro de 2020, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), unidade de pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), no Município de Carpina, PE (7°51'13''S, 35°14'10''W). O clima da região, conforme Koppen, é do tipo Ams, tropical chuvoso de monção, com verão seco. O solo é classificado como Argissolo Amarelo distrófico.

3.2 Cenários experimentais

Foram selecionadas 4 áreas com superfícies planas e diferentes níveis de rigidez. A primeira, apresentava um solo agrícola preparado (SAP) com uma grade aradora e com uma grade niveladora, até a profundidade de 0,20 m (Figura 4). Todo material vegetal que pudesse atrapalhar na visualização da área de contato foi retirado no momento do experimento.



Figura 4. Solo agrícola preparado (SAP)

A segunda área foi um solo agrícola cultivado (SAC) com cana-de-açúcar com nove colheitas sucessivas. A cana-de-açúcar apresentava uma altura variando de 0,50 m a 1,0 m durante o experimento. Foram escolhidos pontos onde não havia presença da cultura, ou seja pontos de falha, para que não houvesse obstrução da área de contato (Figura 5).



Figura 5. Solo agrícola cultivado com cana-de-açúcar (SAC).

A terceira foi uma estrada vicinal, compactada (EVC). Essa estrada (Figura 6) é utilizada para tráfego de caminhões e tratores agrícolas responsáveis pelo transporte da cana-de-açúcar e manejo do solo respectivamente.



Figura 6. Estrada vicinal compactada

Por fim, a última área, que apresentava uma superfície de concreto simples (SCS). Essa superfície (Figura 7) é referente ao piso da oficina da EECAC, local onde é realizada a manutenção dos tratores e implementos agrícolas. Todo piso é formado por concreto simples.



Figura 7. Superfície de concreto simples (SCS)

Algumas propriedades como densidade, teor de umidade e resistência do solo à penetração (RSP) podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Características das áreas utilizadas

Áreas	Densidade (g.cm ⁻³)	Teor de umidade (%)	RSP (MPa)
	0 – 0,1 m	0 – 0,1 m	0 – 0,1 m
SAP	1,54	23,6	5,3
SAC	1,61	8,6	14,7
EVC	2,2	4,6	ND
SCS	2,4*	NA	NA

RSP: resistência do solo à penetração, SAP: solo agrícola preparado, SAC: Solo agrícola cultivado, EVC: estrada vicinal compactada, SCS: superfície de concreto simples, ND: não disponível, NA: não aplicável, * estimativa da densidade do concreto simples (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011)

3.3 Características do trator utilizado

Foi utilizado um trator da marca Massey Ferguson, modelo 265. O trator estava lastrado nos pneus traseiros, sendo preenchidos com 75% de água. O veículo possui tração 4×2 e tem uma massa de 870 kg no eixo dianteiro e 1.440 kg no eixo traseiro, não havendo nenhum implemento acoplado ao trator. A potência máxima do motor é de 61 CV, com uma potência máxima na tomada de potência de 53 CV. As informações de massa e potência foram obtidas no manual do fabricante.

Com a finalidade de ampliar a amostragem, foram utilizados 2 tipos de pneus no eixo dianteiro e um no eixo traseiro. O primeiro (Figura 8) par de pneus utilizados foi denominado de pneu dianteiro de reboque (PDR), normalmente são utilizados por veículos de transporte

como caminhões utilizados no transporte da cana-de-açúcar, porém também é amplamente utilizado em tratores na ausência ou avaria de um pneu normal de trator, nesse caso eram utilizados por um reboque. O segundo (Figura 8), denominado de pneu dianteiro de trator (PDT), são pneus comumente utilizados por tratores agrícolas no eixo dianteiro e por fim, o último par foi denominado de pneu traseiro de trator (PTT), um pneu agrícola que apresenta garras, instalado no eixo traseiro (Figura 8), também utilizado por tratores agrícolas.

Foi constatado que a pressão de insuflagem utilizada de forma padrão pelos trabalhadores locais, estava abaixo da pressão recomendada, essa pressão reduzida foi mantida, pois dessa forma os resultados retratam a condição real de atividade dos pneus.



Figura 8. Pneu dianteiro de reboque (PDR), pneu dianteiro de trator (PDT) e pneu traseiro de trator (PTT).

Algumas características referentes ao modelo, tipo de construção, propriedades e pressão de insuflagem usada e recomendada de cada pneu utilizado podem ser observadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 2. Características dos pneus utilizados.

Modelo do pneu	7.5-16 Light Truck CT52 Load Range E	7.50-18 8 Lonas Ch Guide Grip	16.9-30 10 Lonas Tl Super All Traction 23° R-1
Abreviação:	PDR	PDT	PTT
Marca:	Pirelli	Firestone	Firestone
Tipo do rodado:	Diagonal	Diagonal	Diagonal
Pressão utilizada (kPa):	206	206	117
Pressão recomendada (kPa):	386	386	193
Diâmetro (cm)	82	86	150
Largura (cm)	22	20	43

3.4 Coleta de amostras

A amostragem do solo foi realizada de maneira a ficarem próximas e representativas da área de contato. As amostras foram coletadas indeformadas, com auxílio de um amostrador Uhland (Figura 9a), em anéis cilíndricos (Figura 9b) de aproximadamente 5 cm de altura e 2 cm de diâmetro, identificadas e envoltas em filme plástico. Essas amostras foram coletadas na profundidade de aproximadamente 0,30 m, de modo que o cilindro coletasse amostras entre 0,03 e 0,08 m no solo, ou seja, a porção central da camada de 0,10 m do solo. Em cada ponto escolhido para área de contato foram realizadas 3 repetições, sendo 9 coletas por pneu, sendo um total de 36 coletas em cada área experimental.



Figura 9. Amostrador Uhland (a) e anel volumétrico (b).

3.5 Densidade e umidade do solo

A densidade dos SAP e SAC foi determinada, conforme metodologia proposta por Almeida et al. (2017). Onde a massa de solo seco (M_{ss}) é dividida pelo volume do solo (V) (Equação 9).

$$D_s = \left(\frac{M_{ss}}{V} \right) \quad (9)$$

Na EVC foi utilizado o método do torrão parafinado (ALMEIDA et al., 2017), e a densidade foi obtida dividindo a massa seca do torrão (M_t) pelo volume do torrão (V_t) (Equação 10).

$$DS = \left(\frac{M_t}{V_t} \right) \quad (10)$$

A densidade da SCS não pode ser medida, então foi estimada em $2,40 \text{ g cm}^{-3}$, sendo um valor médio para densidade de um concreto simples, como visto em Rossignolo e Agnesini (2011).

A umidade gravimétrica (Ug) (Equação 11), e a umidade volumétrica (θ) (Equação 12) foram determinadas de acordo com as equações (VIANA; TEIXEIRA; DONAGEMMA, 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. Para obter a umidade volumétrica, multiplica-se a umidade gravimétrica obtida pela densidade do solo.

$$Ug = \left(\frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \right) \quad (11)$$

$$\theta = (Ds \times Ug) \quad (12)$$

3.6 Resistência do solo à penetração

Os ensaios de resistência do solo à penetração (RSP) foram realizados com um penetrômetro de impacto modelo STOLF (Figura 10). A análise foi realizada até a profundidade 0,10 m, sendo anotado o número de golpes para cada 0,05 m perfurado, com 3 repetições para cada área de contato, sendo 9 coletas por pneu. O total de amostra coletadas por área experimental foi de 36 amostras. Os ensaios foram realizados apenas nos SAP e SAC devido à alta resistência à penetração da EVC e da SCS



Figura 10. Penetrômetro manual modelo STOLF.

3.7 Medição experimental da área de contato

Foi utilizada uma metodologia similar a Mazetto et al. (2004), onde o pneu foi posicionado verticalmente sobre o solo e o contorno do contato com o solo foi delimitado por adição de a cal, após a suspensão do pneu, um quadro de madeira (gabarito), com 0,80 m de comprimento e 0,50 m de largura, foi colocado sobre o solo, para ser capturado uma imagem junto com a área de contato do pneu (Figura 11). Foram realizadas 3 repetições desse procedimento para cada pneu avaliado, por área experimental.

Foi utilizada uma câmera digital, Canon T5. As imagens foram transferidas para o computador e por meio do software AUTOCAD, ajustadas as proporções do tamanho real com o tamanho da imagem. Para esse ajuste foi utilizado a função “Scale” obtendo uma escala para cada imagem, utilizando a trena como parâmetro para determinar o equivalente a 0,10 m na imagem. Posteriormente utilizando a função “Polyline”, foi estabelecido manualmente o perímetro de cada área de contato, e após completo, utilizou-se a função “Area” para descobrir qual a área do perímetro encontrando anteriormente.

Os valores referentes às áreas encontrados no AUTOCAD, foram utilizados para obter a área de contato real (Equação 13), 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 .

$$A = \frac{A_q \cdot A_{pf}}{A_{qf}} \quad (13)$$



Figura 11. Área fotografada superfície de contato pneu-solo dentro do quadro utilizado para delimitação experimental da área.

3.8 Estimativa teórica da área de contato

A área teórica é uma estimativa baseada na forma da super-elipse, onde a área de contato é descrita abaixo (Equação 8):

$$\left|\frac{x}{a}\right|^n + \left|\frac{y}{b}\right|^n = 1 \quad (8)$$

Onde “x” é o comprimento da área na direção do tráfego; “y” é a largura do pneu; a e b são os semieixos na direção x e y, respectivamente; e n, que determina a forma da super-elipse, estimada empiricamente em função da carga e diâmetro do pneu.

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 (C_A), e depende do diâmetro (d), pressão de insuflagem (P_{ins}) e pressão de insuflagem recomendada (P_{rec}) do pneu (Equação 14). O formato da área de contato é obtido pelo parâmetro n (Equação 15), que é dependente do diâmetro (d) e da largura do pneu (W) (KELLER, 2005).

$$C_A = 0,47 + 0,11d^2 - 0,16 \ln\left(\frac{P_{ins}}{P_{rec}}\right) \quad (14)$$

$$n = 2,10(Wd)^2 + 2 \quad (15)$$

3.9 Análise dos dados

Após obtenção de todos os dados, foram feitas médias e os desvios padrão das repetições. Posteriormente, essas médias e desvios padrão foram plotados em tabelas 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).

Por fim, após tratamento no programa AUTOCAD, as imagens das áreas de contato foram dispostas em uma escala qualitativa de rigidez para comparação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios da área de contato e seus respectivos desvios padrão estão dispostos na Tabela 3. O SAP apresentou a maior área de contato e o maior desvio padrão, para todos os pneus avaliados. A área teórica obtida pela fórmula da super-elipse superestimou o valor da área de contato do PDR, PDT e PTT para todas as superfícies, com exceção do PDT no SAP onde o valor se aproximou do obtido experimentalmente.

O solo utilizado por Keller et al. (2007) para avaliação de seu modelo, era um Cambissolo com densidade de $1,66 \text{ g.cm}^{-3}$, sendo realizada uma única passagem da roda de uma colheitadeira com carga na roda de 86 kN, pressão de insuflagem dos pneus de 100 kPa. O SAP é um Argissolo com densidade de $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$, carga na roda de apenas 4,2 kN e pressão de insuflagem de 206 kPa. As densidades dos solos são semelhantes, entretanto a carga na roda é muito menor no SAP, enquanto a pressão de insuflagem de pneu é o dobro da pressão no pneu utilizado colheitadeira.

Possivelmente essas características aliadas a outros fatores como o teor de umidade, textura do solo entre outros, que não puderam ser comparados, influenciaram o resultado da área de contato estimada pela fórmula da super-elipse, fazendo com que esse valor se aproximasse do obtido experimentalmente.

Tabela 3. Médias e desvio padrão* das áreas de contato experimentais e teórica, de cada pneu avaliado.

Áreas	PDR	PDT	PTT
	cm ²		
Teórica	1100	1000	3100
SAP	899 (12,5)	1075 (67,9)	2105 (136,8)
SAC	549 (5,3)	633 (4,1)	1521 (6,8)
EVC	424 (9,3)	518 (1,4)	774 (14,9)
SCS	356 (4,2)	501 (10,7)	694 (3,3)

PDR: pneu dianteiro de reboque, PDT: pneu dianteiro de trator, PTT: pneu traseiro esquerdo, SAP solo agrícola preparado, SAC Solo agrícola cultivado EVC: estrada vicinal compactada, SCS: superfície de concreto simples, * desvio padrão entre parêntesis.

O modelo da super-elipse foi teorizado sendo uma representação da área de contato para solos agrícolas (HALLONBORG, 1996). Fazendo a comparação com as duas áreas de solo agrícolas, ainda há uma superestimação que varia de 1,2 a 1,5 vezes o valor experimental obtido no SAP, e uma superestimação que varia de 1,6 a 2 vezes o valor experimental obtido no SAC.

O SAP apresentou áreas de contato maiores que o SAC. O SAC apresentou áreas maiores que a EVC e a SCS. Na EVC e SCS o padrão se repete, onde EVC é menor que SAC e SCS menor que a EVC. De um modo geral, houve uma redução da área de contato em cada superfície avaliada, com uma diferença de aproximadamente 60%, 53% e 67%, respectivamente entre o maior e o menor registro da área de contato para o PDR, PDT, PTT.

Como as características do pneu permaneceram constante durante o experimento, pressupõe-se que os fatores da superfície influenciaram na variação da área de contato. Isso é corroborado por Sandu et al. (2020) que utilizou uma modelagem específica para área de contato e encontrou que a área experimental foi menor que teórica, 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.

Silva et al. (2016), avaliaram áreas de contato diretamente no campo e compararam os resultados com métodos matemáticos, e os resultados apresentaram diferenças significativas nas diferentes metodologias. Eles utilizaram o modelo da elipse e foi constatado que esse modelo superestima a área de contato em até 1,8 vezes, corroborando com o resultado encontrado.

Mesmo que o modelo da super-elipse superestime a área de contato pneu-solo real, seu resultado ainda é considerado o mais acurado dos modelos. Isso é corroborado por Roça et al. (2014), que apresentaram um modelo semiempírico para previsão da força de tração e eficiência de tração de um trator agrícola, assumindo que a forma da área de contato pneu-solo é uma super-elipse. Seus resultados comprovam que o modelo da super-elipse é mais acurado porque a área dada pelo modelo foi 15% menor do que a obtida por outros modelos.

Essa discrepância entre os modelos teóricos e análise experimental é um indicativo de que os modelos são capazes apenas de reproduzir uma área de contato aproximada, geralmente resultando em áreas superiores, em relação real. Isso pode estar relacionado a diversos fatores que estão vinculados ao fato de que determinadas características da superfície ou do pneu não são consideradas nos modelos.

Ao relacionar as diversas áreas de contato com a densidade das superfícies (Figura 12) obteve-se um ajuste linear com a redução da área de contato e aumento da densidade da superfície. Houve uma maior dispersão dos dados nos valores referentes ao SAP e SAC. Provavelmente, isso ocorre porque como visto na Tabela 1, a densidade do SAP e SAC foram próximas, enquanto o tamanho da área de contato no SAC foi, aproximadamente, 40% menor que no SAP para os PDR e PDT, e 28% menor para PTE.

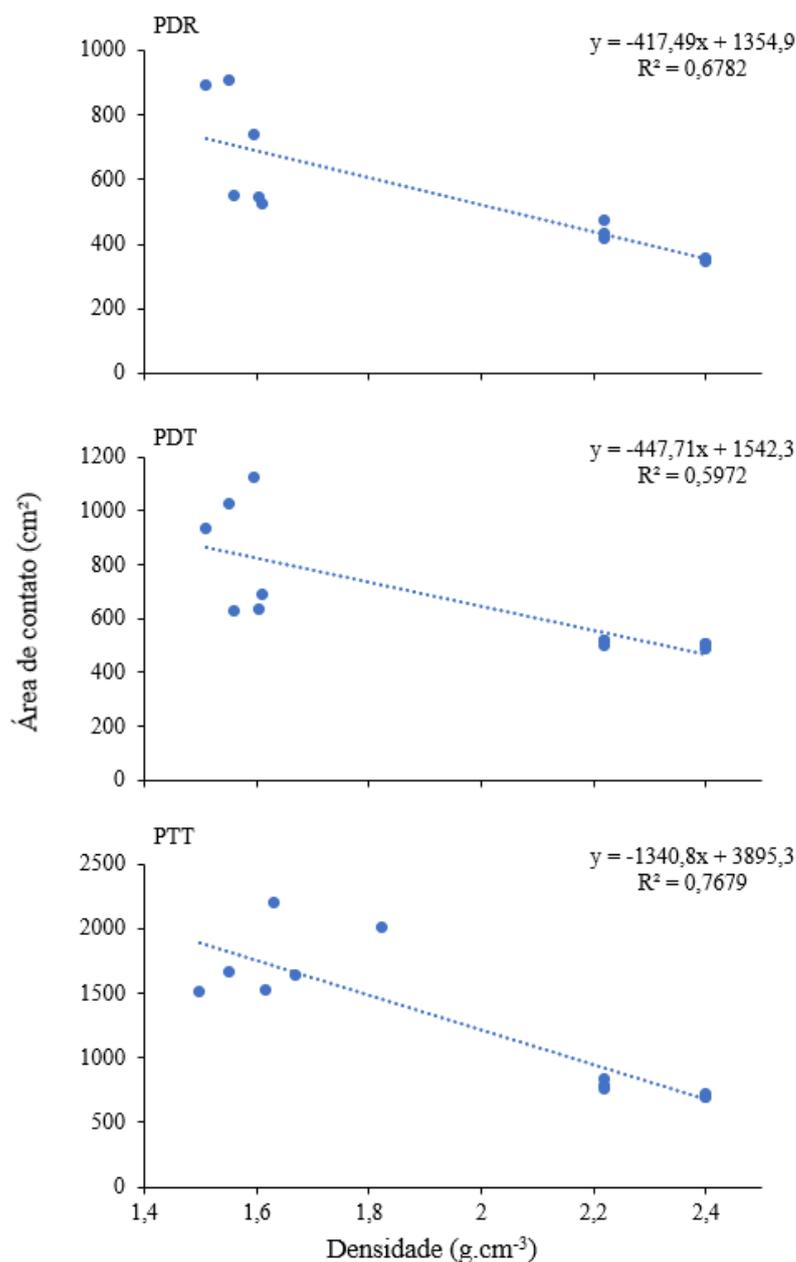


Figura 12. Relação entre área de contato e a densidade da superfície, para o pneu dianteiro de reboque (PDR), pneu dianteiro de trator (PDT) e pneu traseiro de trator (PTT).

Essa dispersão dos dados é refletida no R^2 das curvas que foram de 0,67 (PDR), 0,59 (PDT) e 0,76 (PTT). Esse baixo valor do R^2 , podem ser um indicativo de que apenas a densidade não é um fator determinante para formação da área de contato, ou sua influência seja menor em comparação com outros fatores do solo. Avaliando a densidade como um possível indicador de rigidez, sua relação com a área de contato demonstra que a área de contato tende a aumentar à medida que a densidade da superfície reduz.

A relação entre a área de contato com a umidade (Figura 13) apresentou um ajuste linear de crescimento para os 3 pneus avaliados. Houve um aumento diretamente proporcional da área de contato em função do teor de umidade do solo.

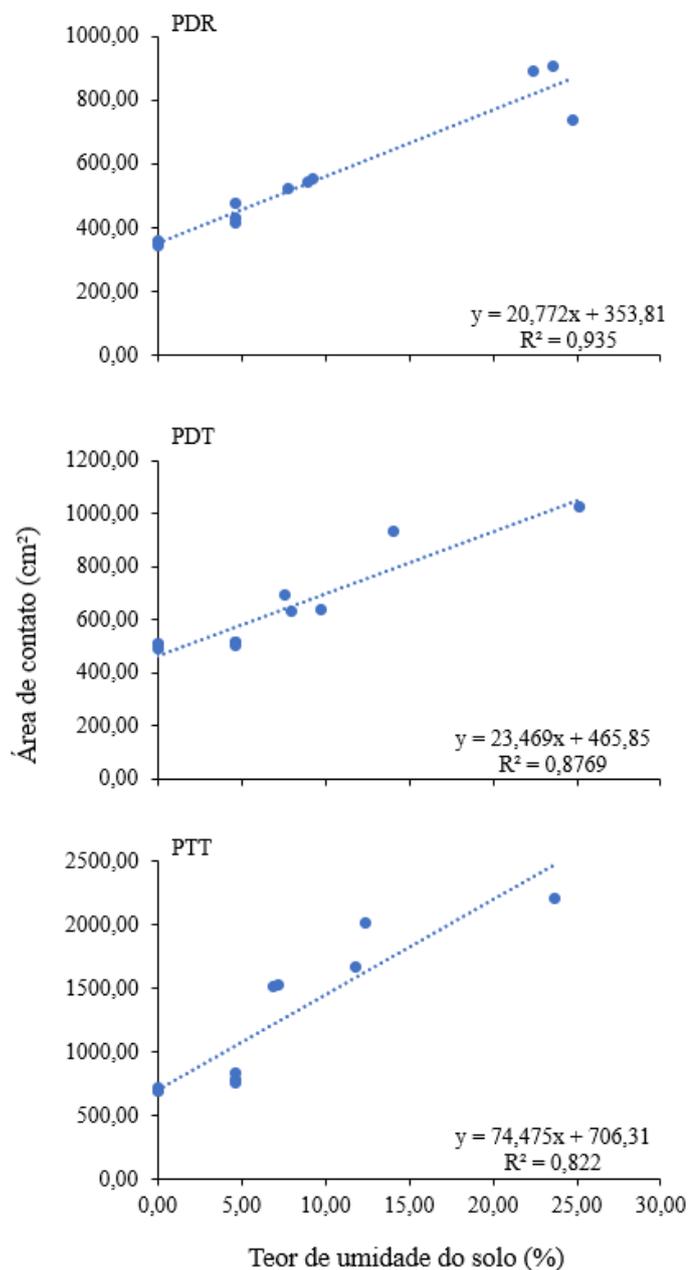


Figura 13. Relação entre área de contato e o teor de umidade do solo, para o pneu dianteiro de reboque (PDR), pneu dianteiro de trator (PDT) e pneu traseiro de trator (PTT).

Ao contrário do obtido com a densidade, o teor de umidade aparenta ter uma relação direta com a área de contato pneu-solo, esse resultado é corroborado pelo R^2 de 0,94 (PDR), 0,87 (PDT) e 0,82 (PTT). O teor de umidade do solo influencia características do solo como rigidez, densidade e estrutura do solo, que por sua vez, influenciam a formação da área de

contato (GENRO JUNIOR et al., 2004). Assim nos solos com maiores teores de umidade a rigidez foi menor e obteve-se as maiores áreas de contato pneu-solo.

Farhadi et al. (2019a), corroboram essas informações, de forma que os seus resultados mostraram que as áreas de contato mínima e máxima foram alcançadas para teores de umidades mínimo e máximo, em todas as pressões de insuflagem testadas. Assim concluíram que, para um maior teor de umidade do solo, a área de contato do pneu foi maior.

Resultados semelhantes foi encontrado 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.

O teor de umidade pode ser a causa da redução da área de contato no SAC, visto que, o teor de umidade reduz de 23,6% (SAP) para 8,6% (SAC), provavelmente causando um aumento na rigidez do solo e proporcionando a redução na área de contato dos pneus. Essa rigidez é promovida pela redução do teor de umidade em conjunto com o aumento da densidade, ocasionando em uma maior rigidez do solo (GUBIANI et al., 2015).

Fernandes et al. (2021) verificou essa relação de rigidez com a umidade ao analisar a influência do teor de umidade na resistência do solo à penetração. Eles encontraram maiores valores de resistência do solo à penetração, quando o solo possuía menor teor de umidade, tendendo a um decréscimo linear com o aumento do teor de umidade no solo.

Corroborando os resultados encontrados por outros autores, os maiores valores de área de contato pneu-solo foram relativos aos maiores teores de umidade do solo. O PDR, PDT e PTT tiveram áreas de contato máximas de 908 cm², 1123 cm², 2202 cm², para os teores de umidade de 24%, 26% e 23%, respectivamente.

Todas as áreas de contato máximas foram obtidas no SAP, como o solo havia sido preparado para o cultivo, essa superfície apresentava melhores condições para retenção de água no solo, o que ocasionou esse maior teor de umidade em relação as outras superfícies agrícolas (WANG et al., 2019).

Utilizando a RSP como indicador de rigidez do solo, os formatos das áreas de contato foram plotados em uma escala qualitativa (Figura 14). Como a forma da área de contato do pneu depende da construção do pneu, da pressão de insuflagem, da carga da roda e das propriedades do solo (DISERENS, 2009), é esperado que a forma gerada pelos pneus seja diferente para cada modelo, porém os pneus PDR e PDT apresentaram formatos de área de contato muito semelhantes entre si.

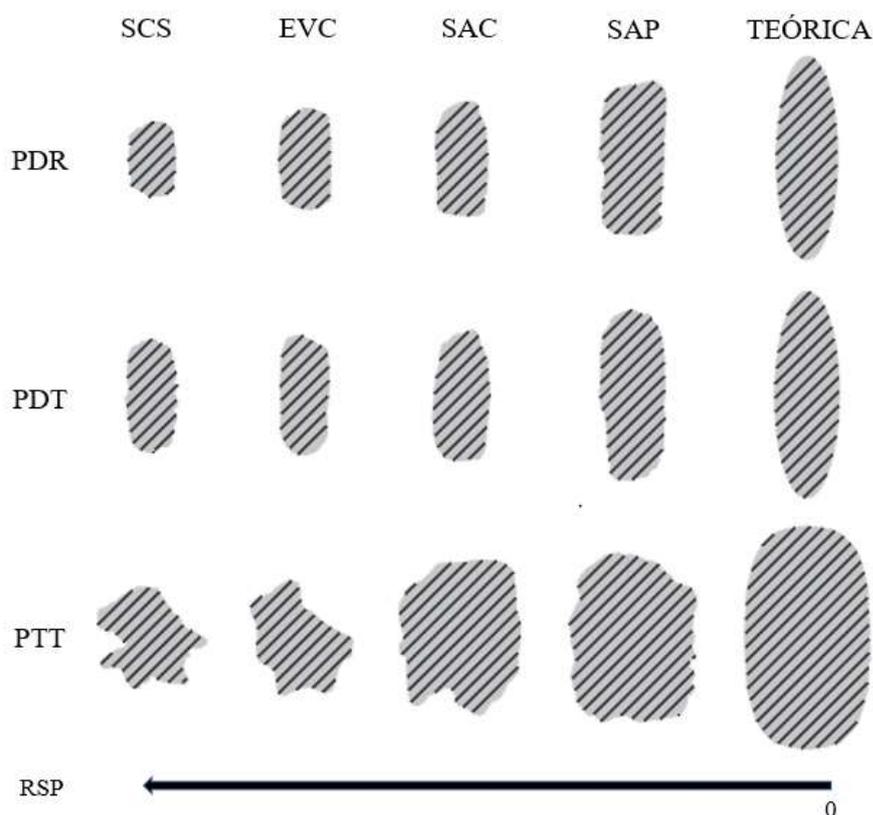


Figura 14. Formato da área de contato em uma escala qualitativa de rigidez do solo, baseada na resistência do solo à penetração (RSP), obtidas experimentalmente e pelo modelo teórico, para o pneu dianteiro do reboque (PDR), pneu dianteiro de trator (PDT) e pneu traseiro de trator (PTT), nas áreas com solo agrícola preparado (SAP), solo agrícola cultivado (SAC), estrada vicinal compactada (EVC) e superfície de concreto simples (SCS).

O RSP indica um aumento na rigidez da superfície e essa rigidez elevada afetou a formação da área de contato de modo a reduzir seu tamanho e alterar o formato, principalmente no PTT. Também é possível observar uma clara distinção entre o formato e tamanho da área de contato dos pneus PDR e PDT em relação ao PTT.

A sobreposição das áreas de contato de cada pneu nas diversas superfícies (Figura 15), demonstra a variação no tamanho e no formato das áreas de contato. O PDR e o PDT mantiveram o formato da área de contato ao longo de todas as superfícies, alterando apenas na estimativa teórica. Os formatos obtidos experimentalmente se assemelham a retângulos com bordas arredondadas.

Esse resultado diferiu do resultado encontrado por Hallonborg (1996), onde ele afirma que a área de contato entre uma superfície rígida e um pneu pode ser descrita por uma elipse, quando o pneu tiver uma pressão de insuflagem baixa.

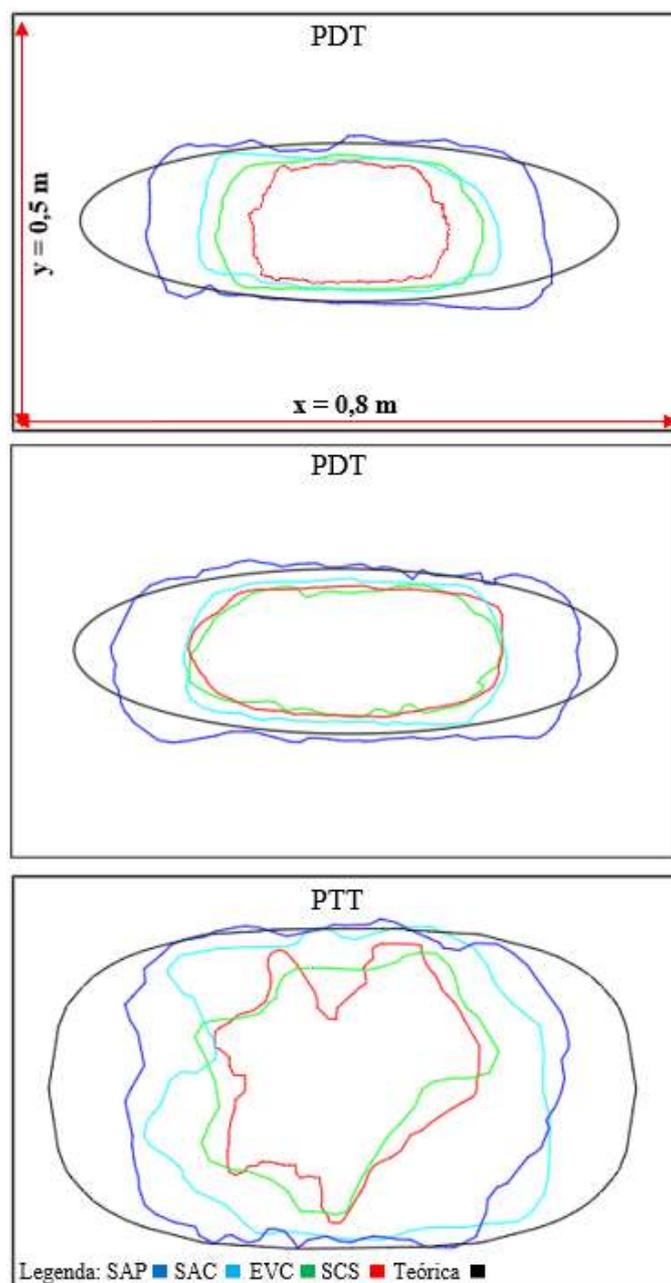


Figura 15. Sobreposição das formas da área de contato, obtidas experimentalmente e pelo modelo teórico, do pneu dianteiro de reboque (PDR), pneu dianteiro de trator (PDT) e pneu traseiro de trator (PTT), nas áreas com solo agrícola preparado (SAP), solo agrícola cultivado (SAC), estrada vicinal compactada (EVC) e superfície de concreto simples (SCS).

É possível observar o aumento gradual da área de contato do PDR ao longo das superfícies. Enquanto isso, o PDT apresenta baixa variação no tamanho da área de contato nas superfícies SCP, EVC e SCS. Esses resultados distintos entre o PDR e o PDT podem estar relacionados à propriedade de deformação do pneu, ou seja, o quanto cada um deflete quando submetido a uma carga (WANG et al., 2021).

Como os dois pneus estavam com a pressão de insuflagem abaixo da pressão recomendada, é esperado que houvesse uma maior deformação de suas carcaças (BIRIS, et

al., 2011). Porém, a área de contato do PDT foi maior que a área do PDR em todas as superfícies, provavelmente devido a uma maior deflexão da carcaça do PDT em relação ao PDR. Esse resultado indica que o PDT possui uma estrutura mais flexível, apresentando áreas de contato maiores, principalmente quando utilizado em baixas pressões de insuflagem (KUČERA; HELEXA; ČEDÍK, 2016).

O PTT apresentou a maior mudança no formato da área. Na SCS e EVC, a área de contato não apresentam uma forma definida, provavelmente devido as garras do pneu que reduzem o contato com a superfície. Nos SAC e SAP é possível observar que houve maior contato com o solo, e um formato semelhante a um retângulo.

O modelo da super-elipse gerou um formato muito próximo a uma elipse, para os PDR e PDT, enquanto o PTT apresentou um formato retangular com bordas ligeiramente arredondadas. Esse resultado era esperado, considerando que o pneu traseiro é maior que os dianteiros e sustenta uma carga maior em seu eixo. Dessa forma, ele causa uma maior deformação no solo e conseqüentemente uma área de contato com esse formato (ten DAMME et al., 2021).

A uniformidade na forma da área de contato nas áreas SCS, EVC e SAC dos pneus PDR e PDT, representada pelo baixo desvio padrão, pode ser reflexo do baixo teor de umidade (<10%), e como afirmado por Farhadi (2019b) em condições com baixa umidade, o solo apresenta uma maior resistência à deformação (rigidez), e como resultado a resistência do pneu à deformação seria o fator determinante para formação da área de contato.

No SAP onde há um maior teor de umidade (> 23%), a deformação do solo é complexa e apresenta um comportamento não linear (YAMASHITA et al., 2018). Devido a isso, as formas da área de contato apresentam uma menor uniformidade (maior desvio padrão), e maior tamanho de área de contato em relação as outras áreas.

Esse resultado é corroborado por Farhadi et al. (2020), que avaliaram o efeito da carga vertical, pressão de insuflagem dos pneus e teor de umidade do solo na perda de potência do trator, e obtiveram erros de, aproximadamente, 15% ao calcular a área de contato por um modelo de elementos finitos, com teores de umidade do solo acima de 11%.

De um modo geral, foi obtido áreas de contato maiores nas superfícies com menor rigidez, e maior teor de umidade. Esse resultado corresponde ao obtido por Diserens (2009), que em sua pesquisa foi concluído que as áreas de contato são maiores em solo solto, enquanto, em solo rígidos, o pneu apresenta menor contato com a superfície já que não há deformação da mesma e sua área de contato é mínima.

5. CONCLUSÕES

O teor umidade do solo é um fator determinante sobre o formato e o tamanho da área de contato, de modo que, quanto maior o teor de umidade maior será a área de contato pneu-solo.

A rigidez da superfície, aparenta ser um fator relevante na forma e tamanho da área de contato. Em situações de solo agrícola, o teor de umidade, aparenta ser a principal variável nessa relação de rigidez.

As medições experimentais da área de contato do pneu com o solo indicaram que o modelo teórico da super-elipse pode superestimar em até 2 vezes o tamanho da área de contato real.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, B. G.; Viana, J. H. M.; Teixeira, W. G.; Donagemma, G. K., (2017). Densidade do solo. Manual de métodos de análises de solo. 3.ed. Brasília, DF: EMBRAPA. 65-75.
- Antunes Júnior, E. J.; Reis, E. F.; Alves, B. G. X.; Oliveira, D. G., (2017). Influência da cobertura vegetal na área de contato e patinação de trator submetido a diferentes forças de tração. *Revista Espacios*, 38, 1.
- Bekker, M. G., (1962). *Theory of Land Locomotion: The mechanics of vehicle mobility*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Biris, S. S., Ungureanu, N., Maican, E., Murad, E., Vladut, V. (2011). FEM model to study the influence of tire pressure on agricultural tractor wheel deformations. *Engineering for Rural Development*, 10, 223-228.
- Bockstal, L., Berchem, T., Schmetz, Q., Richel, A., (2019). Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117574.
- Czarnecki, J., Brennenstul, M., Białyzyk, W., Ptak, W., Gil, Ł. (2019). Analysis of traction properties and power of wheels used on various agricultural soils. *Agricultural Engineering*, 23, 13-23.
- Derafshpour, S., Valizadeh, M., Mardani, A., Saray, M. T. (2019). A novel system developed based on image processing techniques for dynamical measurement of tire-surface contact area. *Measurement*, 139, 270-276.
- Diserens, E. (2009). Calculating the contact area of trailer tyres in the field. *Soil and Tillage Research*, 103, 302-309.
- Diserens, E., Défossez, P., Duboisset, A., Alaoui, A. (2011). Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. *Biosystems Engineering*, 110, 73-82.
- Dörner, J., Bravo, S., Stoorvogel, M., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., Zúñiga, F. (2022). Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an andisol. *Soil and Tillage Research*, 221, 105396.
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Sharifi, A., Shahgholi, G. (2018). Potential of three-dimensional footprint mold in investigating the effect of tractor tire contact volume changes on rolling resistance. *Journal of Terramechanics*, 78, 63-72.
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Malvajerdi, A. S., Shahgholi, G. (2019a). Prediction of the tractor tire contact area, contact volume and rolling resistance using regression model

- and artificial neural network. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21, 26-38.
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Malvajerdi, A. S., Shahgholi, G. (2019b). Finite element modeling of the interaction of a treaded tire with clay-loam soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 793-806.
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Malvajerdi, A. S., Shahgholi, G. (2020). Tire and soil effects on power loss: Measurement and comparison with finite element model results. *Journal of Terramechanics*, 92, 13-22.
- Fernandes, B. B., Marasca, I., Martins, M. B., Sandi, J., Lanças, K. P. (2018). Tráfego de máquinas agrícolas e interação dos rodados com dois solos em diferentes teores de água. *Energia na Agricultura*, 33, 190-195.
- Fernandes, B. B., Marasca, I., Martins, M. B., Sandi, J., Lanças, K. P. (2021). Regressão quadrática para teores de água em função da compactação do solo. *Irriga*, 26, 186-194.
- Genro Junior, S. A., Reinert, D. J., Reichert, J. M. (2004). Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, 477-484.
- Godbole, R., Alcock, R., Hettiaratchi, D. (1993). The prediction of tractive performance on soil surfaces. *Journal of Terramechanics*, 30, 443-459.
- Gubiani, P. I., Lier, Q. D. J. V., Drescher, M. S., Mezzomo, H. C., Veiga, C. M. C. (2015). Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 100-108.
- Gupta, S. C., Larson, W. E. (1982). Modeling soil mechanical behavior during tillage. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. *American Society of Agronomy*, 44, 151-178.
- Hallonborg, U. (1996). Super ellipse as tyre-ground contact area. *Journal of Terramechanics*, 33, 125-132.
- Horabik, J., Jozefaciuk, G. (2021). Structure and strength of kaolinite-soil silt aggregates: Measurements and modeling. *Geoderma*, 382, 114687.
- Jadoski, G. S., Pinheiro, T. D., Júnior, P. D. S. S., Rodrigues, F. R. M. (2016). Influence of the tyre characteristics on the tractor performance. *Applied Research & Agrotechnology*, 9, 115-120.
- Jiang, Q., Cao, M., Wang, Y., Wang, J., He, Z. (2020). Quantification of the soil stiffness constants using physical properties of paddy soils in Yangtze Delta Plain, China. *Biosystems Engineering*, 200, 89-100.

- Johnson, C. E., Burt, E. C. (1990). A method of predicting soil stress state under tires. *Transactions of the ASAE*, 33, 713-0717.
- Johnson, K. L. (1982). One hundred years of Hertz contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 196, 363-378.
- Keller, T., Défossez, P., Weisskopf, P., Arvidsson, J., Richard, G. (2007). SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research*, 93, 391-411.
- Keller, T. (2005). 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*, 92, 85-96.
- Kenarsari, A. E., Vitton, S. J., Beard, J. E. (2018). Tactile pressure sensors to measure ground pressure from tractor tire loads. *Geotechnical Testing Journal*, 41, 1166-1174.
- Kučera, M., Helexa, M., Čedík, J. (2016). Link between static radial tire stiffness and the size of its contact surface and contact pressure. *Agronomy Research*, 14, 1361-1371.
- Kumar, S., Pandey, K. P., Kumar, R., Kumar, A. A. (2018). Effect of ballasting on performance characteristics of bias and radial ply tyres with zero sinkage. *Measurement*, 121, 218-224.
- Machado, T. M., Lanças, K. P., Junior, M. B. D. O., 2014. Ensaio de pneu radial e diagonal agrícola em superfície rígida. *XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA*.
- Marusiak, M., Neruda, J. (2018). Dynamic soil pressures caused by travelling forest machines. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 39, 233-245.
- Mazetto, F. R., Lanças, K. P., Nagaoka, A. K., Castro Neto, P., Guerra, S. P. (2004). Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas. *Engenharia Agrícola*, 24, 750-757.
- Medina, J., (1997). *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Misiewicz, P. A., Blackburn, K., Richards, T. E., Brighton, J. L., Godwin, R. J. (2015). The evaluation and calibration of pressure mapping system for the measurement of the pressure distribution of agricultural tyres. *Biosystems Engineering*, 130, 81-91.
- Novak, E., Carvalho, L. A., Santos, L. L., Hernando, I. D., Panachuki, E. (2017). Densidade do solo e densidade relativa de um Latossolo vermelho submetido a diferentes usos. *Agrotropica*, 29, 31-38.

- O'sullivan, M. F., Henshall, J. K., Dickson, J. W. (1999). A simplified method for estimating soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 49, 325-335.
- Parkhomenko, G. G., Voinash, S. A., Sokolova, V. A., Krivonogova, A. S., Rzhavtsev, A. A. (2019). Reducing the negative impact of undercarriage systems and agricultural machinery parts on soils. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 316, 012049.
- Poritsky, H. (1950). Stress and deflections of cylindrical bodies in cone with applications to contact of gears and locomotive wheels. *Journal of Applied Mechanics*. 17, 191-201.
- Ren, L., D'Hose, T., Ruyschaert, G., De Pue, J., Meftah, R., Cnudde, V., Cornelis, W. M. (2019). Effects of soil wetness and tyre pressure on soil physical quality and maize growth by a slurry spreader system. *Soil and Tillage Research*, 195, 104344.
- Roşca, R., Cârlescu, P., Țenu, I. (2014). A semi-empirical traction prediction model for an agricultural tyre, based on the super ellipse shape of the contact surface. *Soil and Tillage Research*, 141, 10-18.
- Rossignolo, J. A., Agnesini, M. V. C. (2011). Concreto leve estrutural. In *Concreto: ciência e tecnologia*, São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2.
- Saarilahti, M. (2002). Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors. *Project Deliverable*, 2, 6-40.
- Sandu, C., Taheri, S., Taheri, S., Gorsich, D. (2019). Hybrid soft soil tire model (HSSTM). Part I: Tire material and structure modeling. *Journal of Terramechanics*, 86, 1-13.
- Sandu, C., Taheri, S., Taheri, S., Els, S., Jimenez, E. (2020). Hybrid soft soil tire model (HSSTM). Part III: Model parameterization and validation. *Journal of Terramechanics*, 88, 1-15.
- Savioli, J. S.; dos Santos, F. F.; Leite, F.; Lopes, R. A. P. (2020). Operational performance, and physical attributes of the soil under traffic of agricultural tractors. *Research Society and Development*, 9, e3269119903.
- Schjonning, P.; Lamande, M.; Tøgersen, F. A.; Arvidsson, J.; Keller, T. (2008). Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosystems Engineering*, 99, 119-133.
- Stettler, M., Keller, T., Weisskopf, P., Lamandé, M., Lassen, P., Schjønning, P. (2014). Terranimo®—a web-based tool for evaluating soil compaction. *Landtechnik*, 69, 132-138.
- Silva, E. A. A.; Opazo, M. A U.; Rocha, J. V.; Souza, E. G. (2003). Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos de solo e planta. *Acta Scientiarum*, 2, 365-371.

- Silva, E. L.; Nogueira, P. R. D.; Melo, G. S.; Teles, L. A.; Souza, S. D.; de Paula, A. C. M., (2017). Análise dos modos de falhas em pneus de caminhões fora de estrada em uma mineração. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 72, 1.
- Silva, R. B. D., Iori, P., Souza, Z. M. D., Pereira, D. D. M. G., Vischi Filho, O. J., Silva, F. A. D. M. (2016). Pressões de contato e o impacto de conjuntos motomecanizados em Latossolo com presença e ausência de palhada de cana-de-açúcar. *Ciência e Agrotecnologia*, 40, 265-278.
- Sharma, A. K., Pandey, K. P. (1996). A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. *Journal of Terramechanics*, 33, 253-264.
- Shulman, V. L. (2019). Tire recycling. In *Waste*, 489-515.
- Söhne, W., (1953). Druckverteilung im boden und bodenverformung unter schleppereifen. *Grundlagen der Landtechnik*, 5, 49-63.
- Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15, 229-235.
- ten Damme, L., Schjønning, P., Munkholm, L. J., Green, O., Nielsen, S. K., Lamandé, M. (2021). Traction and repeated wheeling—effects on contact area characteristics and stresses in the upper subsoil. *Soil and Tillage Research*, 211, 105020.
- Upadhyaya, S. K., Wulfsohn, D. (1990). Relationship between tire deflection characteristics and 2-D tire contact area. *Transactions of the ASAE*, 33, 25-0030.
- Ungureanu, N., Voicu, G., Vlăduț, V., Biriș, S., Ș. Matache, M. (2016). Inflation pressure and static load effects on contact characteristics at solid soil – tire interface. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 78, 253-264.
- Valle, S. R., Dörner, J., Zúñiga, F., Dec, D. (2018). Seasonal dynamics of the physical quality of volcanic ash soils under different land uses in southern Chile. *Soil and Tillage Research*, 182, 25-34.
- van den Akker, J. J. H. (2004). SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil and Tillage Research*, 79, 113-127.
- Viana, J. H. M., Teixeira, W.G., Donagemma, G. K. (2017). Umidade atual. Manual de métodos de análises de solo. 3.ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 29-31.
- Wang, D., Li, C., Parikh, S. J., Scow, K. M. (2019). Impact of biochar on water retention of two agricultural soils—A multi-scale analysis. *Geoderma*, 340, 185-191.

- Wang, D. Y., Ma, W., Chang, X. X., Wang, A. G. (2005). Study on the resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium. *Cold Regions Science and Technology*, 42, 194-200.
- Wang, G., Yu, K., Liang, C., Mei, Y. (2021). Influence of contact area deformation distribution of tire on tire noise, rolling resistance and dry grip performance. *International Journal of Automotive Technology*, 22, 231-242.
- Yamashita, H., Jayakumar, P., Alsaleh, M., Sugiyama, H. (2018). Physics-based deformable tire–soil interaction model for off-road mobility simulation and experimental validation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 13, 021002.
- Yong, R. N.; Boonsinsuk, P.; Fattah, E. A. (1980). Prediction of tyre performance on soft soil relative to carcass stiffness and contact areas. *Journal of Terramechanics*, 17, 131-147.
- Yue, L., Wang, Y., Wang, L., Yao, S., Cong, C., Ren, L., Zhang, B. (2021). Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure. *Soil and Tillage Research*, 214, 105166.
- Zemolin, L., Antunes, A. D., Knierim, L. F., Bock, R., Dias, V. (2017). Influência da pressão de inflação dos pneus do trator na área de contato pneu/solo. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, 8, 2.