

TENSÕES APLICADAS NO SOLO PELAS DIFERENTES PRESSÕES DO PNEU DE UM TRATOR AGRÍCOLA

Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p63-77/2016>

**RENILDO L. MION¹, ÁUREA S. DE HOLANDA², SUELLY H. DE A. BARROSO³,
SAMUEL DE A. T. E SILVA⁴**

RESUMO: A distribuição das tensões provocadas por rodados das máquinas agrícolas é dependente da carga da roda e da pressão interna do pneu, bem como das condições do solo. O objetivo do presente trabalho consistiu em avaliar numericamente a distribuição dos deslocamentos e das tensões atuantes em um solo coletado no Estado do Ceará, provocada pela passagem de um trator agrícola. O peso individual do pneu traseiro (dimensões 18.4-34 R1) em que foi medida a área de contato do pneu com o solo era de 17,1 kN. Nas análises numéricas, baseadas no método dos Elementos Finitos, foram considerados diferentes valores da pressão interna do pneu (96,5 kPa, 124,0 kPa, 151,0 kPa e 179,0 kPa) com suas respectivas áreas de contato (0,2256 m², 0,1660 m², 0,1522 m² e 0,1393 m²). A partir dos resultados obtidos, verificou-se que as tensões verticais encontradas na superfície do solo foram aproximadamente iguais às pressões de inflação dos pneus. A menor pressão provocou a menor tensão no solo, demonstrando a importância da redução das pressões na diminuição da compactação do solo até profundidades de 0,30 m. As maiores pressões causaram as maiores deformações no solo provocadas pela diminuição da área de contato pneu/solo. Ficou evidente neste estudo que é necessário buscar soluções para reduzir as pressões de trabalho de forma a causar menor compactação superficial do solo devido às tensões verticais e horizontais.

PALAVRAS-CHAVE: método dos elementos finitos, módulo resiliente, compactação, pneus.

SOIL TENSIONS FROM DIFFERENT PRESSURES CAUSED BY FARM TRACTOR TIRES

ABSTRACT: The distribution of tensions caused by agricultural machinery depends on wheel load and inner tire pressure, as well as soil conditions. This study aimed to evaluate numerically displacements and tensions caused by tractor traffic on soil from the state of Ceará, Brazil. The rear tire weight (size 18.4-34 R1) on its contact area with the soil was 17.1 kN. Different inner pressures were considered in the numerical analysis based on the method of Finite Elements (96.5 kPa, 124.0 kPa, 151.0 kPa and 179.0 kPa), with their respective contact areas (0.2256 m², 0.1660 m², 0.1522 m² and 0.1393 m²). Our findings showed that vertical tensions on soil surface were nearly equal to tire inflation pressures. The lower pressure promoted less tension on the soil, showing that pressure reduction is necessary for further decreases on soil compaction up to a depth of 0.30 m. We also concluded that is essential to seek for solutions to reduce operating pressures, in order to decrease surface soil compaction derived from vertical and horizontal tensions.

KEYWORDS: Finite Element Method, resilient modulus, compression, tires.

¹ Eng^o Agrícola, Prof. Doutor, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Rondonópolis, Rondonópolis – MT, Fone: (66) 3410-4063, renildomion@gmail.com

² Eng^a Civil, Profa. Doutora, Departamento de Integração Acadêmica e Tecnológica, Universidade Federal do Ceará/Fortaleza- CE, Fone: (85) 3366-9606, aurea@det.ufc.br

³ Eng^a Civil, Profa. Doutora, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará/Fortaleza- CE, Fone: (85) 3366-9488 (R. 243), suelly@det.ufc.br

⁴ Eng. Civil, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará/Fortaleza- CE, samuel@det.ufc.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 10-5-2013

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 22-6-2015

INTRODUÇÃO

Os conceitos de tensão e de deformação são fundamentais, juntamente com as teorias de elasticidade e de plasticidade, originadas no campo da Resistência dos Materiais e utilizadas na dinâmica do solo, para se estabelecer bases teóricas dos fenômenos de reação do solo às pressões impostas, como no caso dos rodados das máquinas (MIALHE, 1993).

O deslocamento de tratores sobre o solo provoca tensões mecânicas diretamente abaixo do pneu. As características dessa distribuição de tensões são dependentes de parâmetros dos pneus, tais como carga da roda e pressão de inflação, bem como das condições do solo (KELLER, 2005).

Observações relatadas por ANSORGE & GODWIN (2007, 2008), DISERENS (2009) e ARAÚJO-JÚNIOR & DIAS JÚNIOR (2011) destacam a importância das cargas nas rodas e nos pneus, juntamente com as características do tamanho, da pressão de inflação e da área de contato pneu-solo nos estudos de compactação. Para SCHJONNING et al. (2008), LAMANDÉ & SCHJONNING (2008) e SCHJONNING & LAMANDÉ (2010), a pressão de inflação do pneu está diretamente relacionada com as tensões transmitidas ao longo do perfil do solo, e BIRIS et al. (2007) concluíram que as tensões no solo são fortemente influenciadas pela distribuição da carga na área de contato pneu-solo.

De acordo com SCHJONNING et al. (2008), a tensão no solo é maior abaixo do centro do pneu, reduzindo para as bordas laterais. MOHSEMANESH & 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.

WAY & KISHIMOTO (2004) demonstraram que 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. Essa comprovação gera a importância da determinação precisa da área de contato que pode, então, ser utilizada como dado de entrada em um programa de análise para a obtenção da distribuição de tensões e de deformações ao longo do perfil do solo, conforme relato de diversos pesquisadores (HU & ABEELS, 1994; ZHANG et al., 2001; ABU-HAMDEH & REEDER, 2003; MOHSEMANESH et al., 2009; XIA, 2011; NANKALI et al., 2012).

Para se realizar a análise das tensões e das deformações nos solos, frente à passagem de uma máquina agrícola, é necessário o conhecimento de algumas propriedades mecânicas dos mesmos, bem como o uso de métodos numéricos que agilizem a realização dos cálculos. Um parâmetro importante que é utilizado como entrada de dados de um sistema computacional para o cálculo das tensões e das deformações nos diferentes pontos de uma estrutura é o Módulo de Resiliência (MR) de um dado material.

A relação entre a tensão-desvio aplicada repetidamente e a deformação recuperável correspondente é, por definição, o MR de um material. Pode-se perceber que o conceito do MR é similar ao conceito do módulo de elasticidade (E), sendo que o MR é obtido mediante atuação de um carregamento cíclico e não estático. Pode-se afirmar que a resiliência é a capacidade de um material voltar ao seu estado natural após sofrer atuação de uma carga por repetidas vezes. O MR pode então ser utilizado na área agrícola para se investigar as características da deformabilidade dos solos, ao longo de sua profundidade. Uma das alternativas para se analisar as tensões e as deformações que vão ocorrer nas camadas do solo é o emprego de métodos numéricos.

Dentre os métodos numéricos existentes para a análise das tensões e das deformações ao longo de uma camada de solo, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é o mais utilizado para essa finalidade. O MEF (COOK et al., 2002; BATHE, 1996) é bastante difundido na Engenharia Civil como ferramenta de análise de diversos problemas, dentre os quais o cálculo de deslocamentos e tensões em estruturas formadas por múltiplas camadas, como, por exemplo, os pavimentos asfálticos que possuem uma camada de revestimento asfáltico e camadas de materiais granulares. Como os solos podem ser considerados como pavimentos com uma única camada (solo),

procurou-se empregar os conceitos de MR e o MEF para explicar fenômenos que ocorrem devido ao tráfego de máquinas em solos agrícolas.

Assumindo-se que a pressão interna dos pneus influencia nas tensões transmitidas para o solo ao longo de sua profundidade e que há variação das tensões verticais, horizontais e da deformação do solo, conforme ocorra variação da pressão e da área de contato pneu-solo, o trabalho consistiu em avaliar numericamente, através do MEF, a distribuição dos deslocamentos verticais e das tensões normais (verticais e horizontais) de um dado solo, provocada pela passagem de um trator agrícola para diferentes valores da pressão interna do pneu.

MATERIAL E MÉTODOS

A coleta do solo foi realizada em uma área experimental pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, localizada no Câmpus do Pici, em Fortaleza-CE. A referida área encontrava-se há seis meses em pousio, com crescimento de vegetação espontânea. O trator utilizado nos testes estava com peso individual nos rodados traseiros de 1,71 kN, e equipado com pneus traseiros com dimensão de 18.4-34 R1, sendo avaliada a área de contato individual do pneu traseiro com o solo, variando a pressão de inflação, apresentada na Tabela 1.

TABELA 1. Área de contato para as diversas pressões do pneu investigadas. **Contact area for the different investigated tire pressures.**

Pressão do Pneu (kPa)	Área de Contato (m ²)
96,5	0,2556
124,0	0,1660
151,0	0,1522
179,0	0,1393

Na determinação da área de contato entre o pneu e o solo, utilizou-se da metodologia proposta por MAZETTO et al. (2004), em que um quadro de madeira foi colocado e ajustado sobre o solo, contendo calcário, para ser fotografado junto com a área de contato do pneu para cada pressão estudada. As fotos digitais foram descarregadas em um microcomputador, e as leituras gráficas dessas áreas de contato foram obtidas utilizando o software AUTOCAD (AUTODESK, 2000), sendo ajustadas às áreas. O carregamento sobre o pneu do trator foi obtido por meio do cálculo da distribuição do peso do mesmo sobre os eixos dianteiro e traseiro.

Ensaio de módulo de resiliência

O MR foi obtido através da realização do ensaio triaxial dinâmico (Figura 1). Este método avalia o comportamento dos materiais frente à repetição das cargas, e seus resultados podem ser utilizados na análise mecânica de um sistema de múltiplas camadas como é o caso dos pavimentos rodoviários.



(a) Equipamento triaxial dinâmico



(b) Cilindro tripartido

FIGURA 1. Ilustração do equipamento e molde usado no ensaio para a determinação do MR. **Picture of the equipment and mold used for MR determination.**

O módulo de resiliência de um dado material é calculado de acordo com a [eq. (1)] (MEDINA & MOTTA, 2005).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

em que,

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3;$$

σ_1 = tensão axial cíclica,

σ_3 = tensão confinante.

A deformação recuperável ou resiliente (ε_r) pode ser calculada de acordo com a [eq. (2)]:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta_h}{h_0} \quad (2)$$

em que,

Δ_h = deslocamento axial recuperável ou resiliente;

h_0 = altura inicial do corpo de prova.

O ensaio de MR é dividido em duas etapas: (i) a primeira etapa é a do condicionamento e (ii) a segunda etapa é a do registro das deformações pelo equipamento onde é calculado o valor de MR. A determinação do módulo de resiliência dos solos pode ser realizada de acordo com o método preconizado pela COPPE/UFRJ e apresentado em MEDINA & MOTTA (2005), conforme recomendação dos pares de tensão contidos na norma do DNIT-ME 134/2010 (DNIT, 2010).

Na etapa do condicionamento, foram aplicadas 500 repetições, com uma frequência de 0,33 Hz e duração de 0,1 s, para os três ciclos de pares de tensão-desvio e tensão confinante relacionados na Tabela 2. O objetivo dessa fase é eliminar as deformações permanentes que ocorrem após as primeiras aplicações da tensão-desvio, como também minimizar os efeitos decorrentes da história de tensões da amostra a ser ensaiada.

A segunda etapa, referente ao registro das deformações, corresponde ao ensaio propriamente dito. Nesta etapa, foram aplicadas 10 repetições, com uma frequência de 0,33 Hz e duração de 0,1 s, para os 18 pares de tensão-desvio e tensão confinante predeterminados na norma do DNIT 134/2010 ME (ver Tabela 3). Durante os 18 ciclos de aplicação de carga, os deslocamentos verticais foram registrados através de instrumentos do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducers*), e as deformações específicas resilientes da amostra foram calculadas.

TABELA 2. Tensões para a fase de condicionamento de acordo com o método da COPPE/UFRJ e do DNIT 134/2010 ME. **Tensions for conditioning stage according to method proposed by COPPE/ UFRJ and DNIT 134/2010 ME.**

Ciclos	Tensão confinante σ_3 (kPa)	Tensão desvio σ_d (kPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
1	68,9	68,9	2
2	68,9	206,8	4
3	102,9	309,0	4

TABELA 3. Tensões para a determinação de módulo de resiliência conforme método da COPPE/UFRJ e do DNIT 134/2010 ME. **Tensions for resilient modulus determination according to method proposed by COPPE / UFRJ and DNIT 134/2010 ME.**

Ciclos	Tensão confinante σ_3 (kPa)	Tensão-desvio σ_d (kPa)	Razão de tensões σ_1/σ_3
1		20,7	2
2	20,7	41,4	3
3		62,1	4
4		34,5	2
5	34,5	68,9	3
6		102,9	4
7		50,4	2
8	50,4	102,9	3
9		155,2	4
10		68,9	2
11	68,9	137,9	3
12		206,8	4
13		102,9	2
14	102,9	206,8	3
15		309,0	4
16		137,9	2
17	137,9	274,7	3
18		412,0	4

A modelagem da variação do MR com o estado de tensão pode ser avaliada através do desempenho de diferentes modelos de equações (equações 3 a 7) consolidados conforme LIMA (2008) e ARAÚJO (2009). O modelo a ser selecionado para entrada de dados no programa de MEF é aquele que apresenta o maior coeficiente de determinação (R^2). Para a realização do presente trabalho, empregou-se o modelo representado pela [eq. (7)], uma vez que o módulo foi constante para todas as tensões aplicadas.

$$M_R = k_1 \sigma_3^k \quad (3)$$

$$M_R = k_1 \sigma_d^k \quad (4)$$

$$M_R = k_1 \theta^k \quad (5)$$

$$M_R = k_1 \sigma_3^k \sigma_d^k \quad (6)$$

$$M_R = k \quad (7)$$

em que,

θ = Invariante de tensão ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), considere-se para o ensaio de MR que $\sigma_2 = \sigma_3$

k, k_1, k_2 e k_3 = Parâmetros de regressão.

A realização de uma análise utilizando o MEF envolve três etapas bem definidas: o pré-processamento, a análise propriamente dita e o pós-processamento. Na primeira etapa, o gerador de malhas bidimensionais de pavimentos PMG (Pavement Mesh Generator), desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC), foi utilizado (COUTINHO et al., 2008; CAVALCANTE et al., 2008). Esse programa apresenta uma interface gráfica bastante amigável e tem como vantagem, em relação aos pré-processadores genéricos, possuir uma pequena quantidade de dados de entrada. Por ser um gerador para sistemas em camadas (número qualquer) pode ser facilmente utilizado para análise de tensões e deformações em solos.

A etapa de análise foi realizada pelo sistema computacional CAP3D, que é um programa para análise através do MEF que está sendo desenvolvido no LMP/UFC (HOLANDA et al., 2006). No seu estágio atual, o CAP3D possui a capacidade de tratar modelos planos, axissimétricos e tridimensionais, utilizando elementos de diferentes formas (triângulos, quadriláteros, tetraedros e hexaedros) e ordens de interpolação (linear e quadrática). O sistema é capaz, também, de realizar análises lineares e não lineares, através de diferentes algoritmos. É importante ressaltar que a etapa da análise é realizada a partir da interface do próprio PMG, uma vez que os sistemas estão integrados.

A terceira e última etapa está relacionada à visualização dos resultados obtidos na análise realizada. A distribuição das tensões horizontais e verticais, assim como os deslocamentos gerados no solo, pode ser visualizada no programa Nlpos (PITANGUEIRA & PARENTE JÚNIOR, 2012). A chamada do sistema também é realizada a partir do PMG, estando, assim, os três sistemas completamente integrados. Essa integração facilita bastante o trabalho do usuário além de contribuir para a diminuição do tempo na obtenção dos resultados.

Neste trabalho, foi gerada uma malha mista composta por 475 elementos finitos quadráticos de 8 (oito) nós (Q8) (COOK et al., 2002) e 43 elementos infinitos lagrangeanos de 6 (seis) nós (Figura 2). Estes últimos são elementos utilizados em casos cuja região de interesse não possui condições de contorno bem definidas, pois os mesmos são capazes de simular o “infinito” através de funções especiais de mapeamento da geometria (MARQUES & OWEN, 1984). É importante ressaltar que a grande vantagem do uso de elementos infinitos é a diminuição do tamanho do modelo e, conseqüentemente, do esforço computacional, além de melhorar a qualidade dos resultados (SILVA et al., 2013).

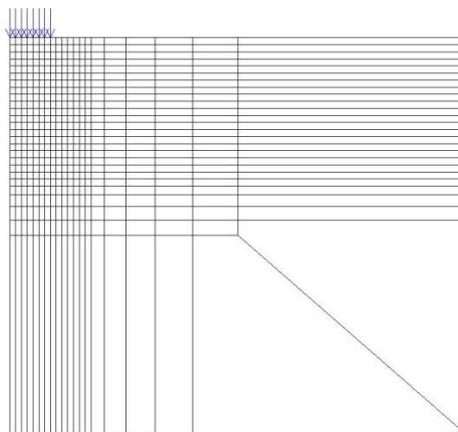


FIGURA 2. Malha Mista (elementos finitos e infinitos) utilizada para demonstrar o local de aplicação da carga. **Mixed mesh (finite and infinite domains) for load application point.**

A partir desta malha mista, foram realizadas análises considerando quatro áreas de contato diferentes e suas respectivas pressões: 0,2250 m² (96,5 kPa); 0,1660 m² (124,0 kPa); 0,1522 m² (151,0 kPa) e 0,1393 m² (179,0 kPa), sendo que a carga aplicada pelo pneu sobre a superfície do solo foi considerada homogeneamente distribuída. Todas as análises consideraram o material elástico linear com coeficiente de Poisson igual a 0,4 e Módulo de Young igual a 40 MPa. Em seguida, com o objetivo de analisar a influência do módulo na distribuição de deslocamentos verticais, foram realizadas novas análises, considerando seu valor como 30 MPa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo coletado foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2006), apresentando características e resultados do ensaio de Proctor (energia normal), conforme a Tabela 4.

TABELA 4. Características do solo na camada de 0-0,20 m de profundidade na área experimental.
Soil characteristics at a depth of 0-0.20 m in the experimental area.

Classificação textural	Franco-arenoso	Limite de liquidez (%)	13,47
Densidade de partículas (g/cm ³)	2,72	Limite de plasticidade (%)	Não plástico
Densidade do solo (g/cm ³)	1,68	Índice de plasticidade (%)	13,47
Porosidade (%)	36,23	Argila (%)	10,62
Saturação inicial (%)	62,13	Areia (%)	82,91
Umidade da amostra (%)	10,35	Silte (%)	6,46

O valor do MR do solo obtido, na umidade ótima de 10,35%, após a realização do ensaio triaxial dinâmico, foi igual a 40 MPa. Esse valor de MR foi calculado através do emprego do modelo representado pela Equação (7), uma vez que o módulo se manteve constante para todas as tensões aplicadas e foi adotado para análise no programa computacional CAP3D.

Tensões e Deslocamento Vertical

A distribuição de tensões e deformações do solo é afetada por uma série de fatores, incluindo a pressão da inflação dos pneus. Quando a pressão interna aumenta, a área de contato pneu-solo diminui, gerando aumento no valor do deslocamento vertical. Esse acréscimo ocorre porque a mesma força é aplicada de forma mais concentrada, concordando com MCDONALD et al. (1995) e MONTEIRO et al. (2010). A Figura 3 confirma este acréscimo através de cores que ilustram a distribuição dos deslocamentos verticais para as diferentes pressões. Nestas análises, foi considerado um valor de 40 MPa para o MR do solo.

Quando um solo é submetido ao tráfego de máquinas, as camadas que compõem sua estrutura são submetidas às variações das tensões devido à ação da carga dinâmica imposta pelo rodado. A ação de uma carga na roda de um veículo induz a tensões normais e cisalhantes em todas as faces do elemento de contato, tensões essas oriundas da decomposição da tensão resultante segundo as direções dos três eixos de coordenadas, representados por X, Y e Z. Nas faces opostas do elemento, atuam as tensões de reação iguais em magnitude e direção, e em sentidos opostos, mantendo-se assim a condição de equilíbrio dinâmico.

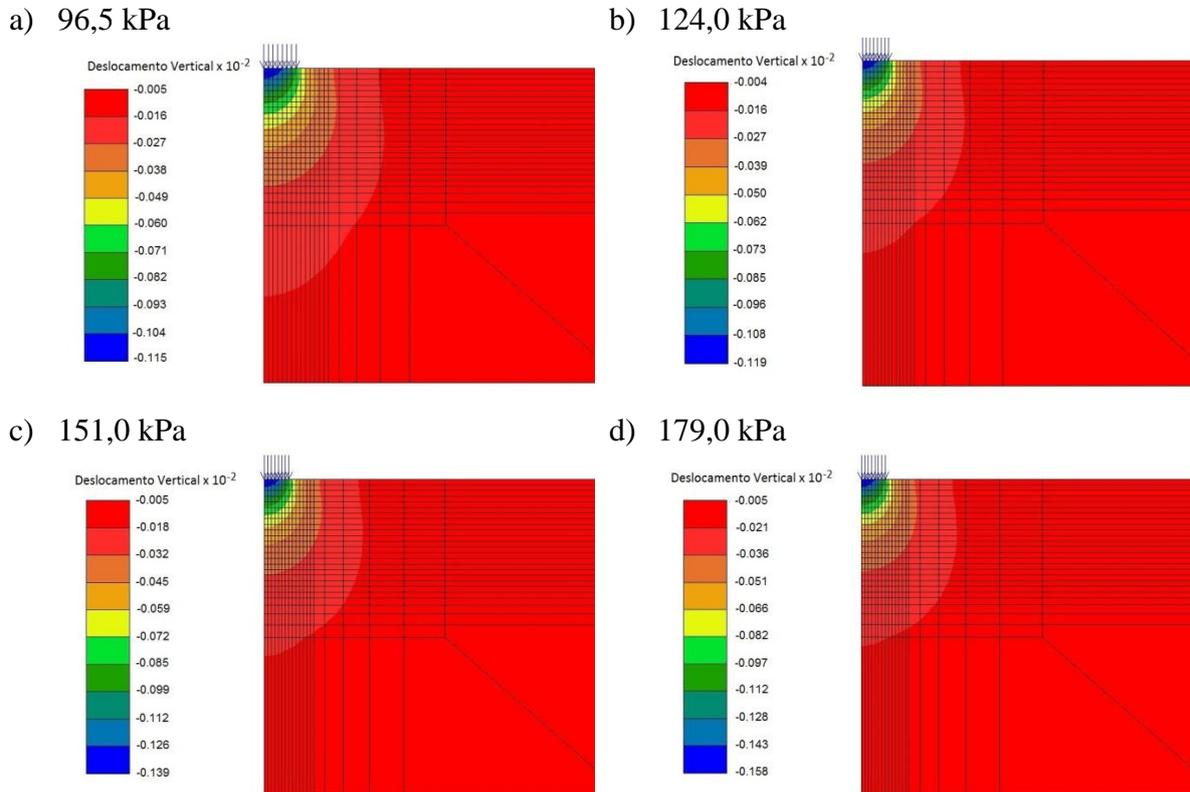


FIGURA 3. Distribuição do deslocamento vertical para cada pressão de pneu investigada: 96,50 kPa (a); 124,0 kPa (b); 151,0 kPa(c); 179,0 kPa(d). **Vertical displacement distribution for each tire pressure: 96.50 kPa (a); 124.0 kPa (b); 151.0 kPa(c); 179.0 kPa(d).**

Para a variação das tensões normais horizontais com a profundidade (Figura 4), observa-se que, no solo analisado, as tensões de compressão são maiores na superfície, próximo ao carregamento, e diminuem com o aumento da profundidade. Pode-se ainda perceber que os valores também variam com a pressão de inflação do pneu, sendo maiores para as pressões mais altas, como esperado. A partir de aproximadamente 0,5 m de profundidade, o valor da tensão horizontal praticamente se anula (análises computacionais apresentam erros numéricos), permanecendo desta forma até o limite da maior profundidade analisada (1,0 m). Esse comportamento do aumento da tensão horizontal está de acordo com os encontrados por WALUBITA & VEN (2000), quando aumentaram a pressão de inflação dos pneus.

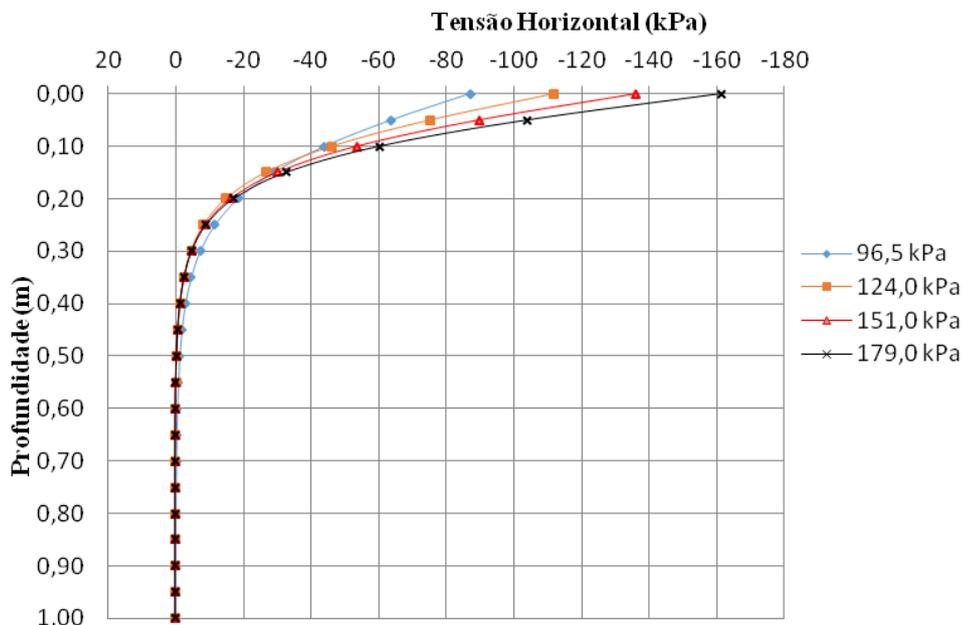


FIGURA 4. Variação das tensões horizontais com o acréscimo da pressão de pneus para o solo para diferentes pressões investigadas. **Horizontal tension variation with tire pressure increase.**

A Figura 5 apresenta os resultados das simulações de distribuições das tensões verticais nas proximidades do ponto de aplicação da carga para diferentes valores de pressão. Percebe-se que as tensões máximas estão abaixo do centro da carga vertical, reduzindo-se com o afastamento do centro de aplicação. Trabalhando com métodos analíticos, VANDENBERG & GILL (1962) observaram que o comportamento das tensões na superfície do solo tem a tendência de se concentrar ao redor do eixo vertical e abaixo do centro de aplicação da carga. De acordo com SOHNE (1958), as maiores tensões geralmente são mais concentradas em direção ao centro do carregamento da área, diminuindo para o exterior da área de contato; entretanto, ABU-HAMDEH & REEDER (2003) salientam que os modelos analíticos utilizados para este fim apresentam limitações porque o solo não é submetido a todas as solicitações. Avaliando as tensões no solo utilizando métodos numéricos (MEF), BASTOS et al. (2012) demonstraram que as tensões na superfície do solo têm a tendência de se concentrar ao redor do eixo vertical e abaixo do centro de aplicação da carga.

A maior área de contato pneu-solo ocorreu nas menores pressões, decrescendo conforme o aumento da pressão interna do pneu. Como esperado, em todos os casos, as tensões verticais encontradas na superfície do solo foram praticamente iguais ao valor da pressão aplicada. A diferença foi em torno de 0,5%, ocasionada por erros numéricos comuns a qualquer metodologia não analítica.

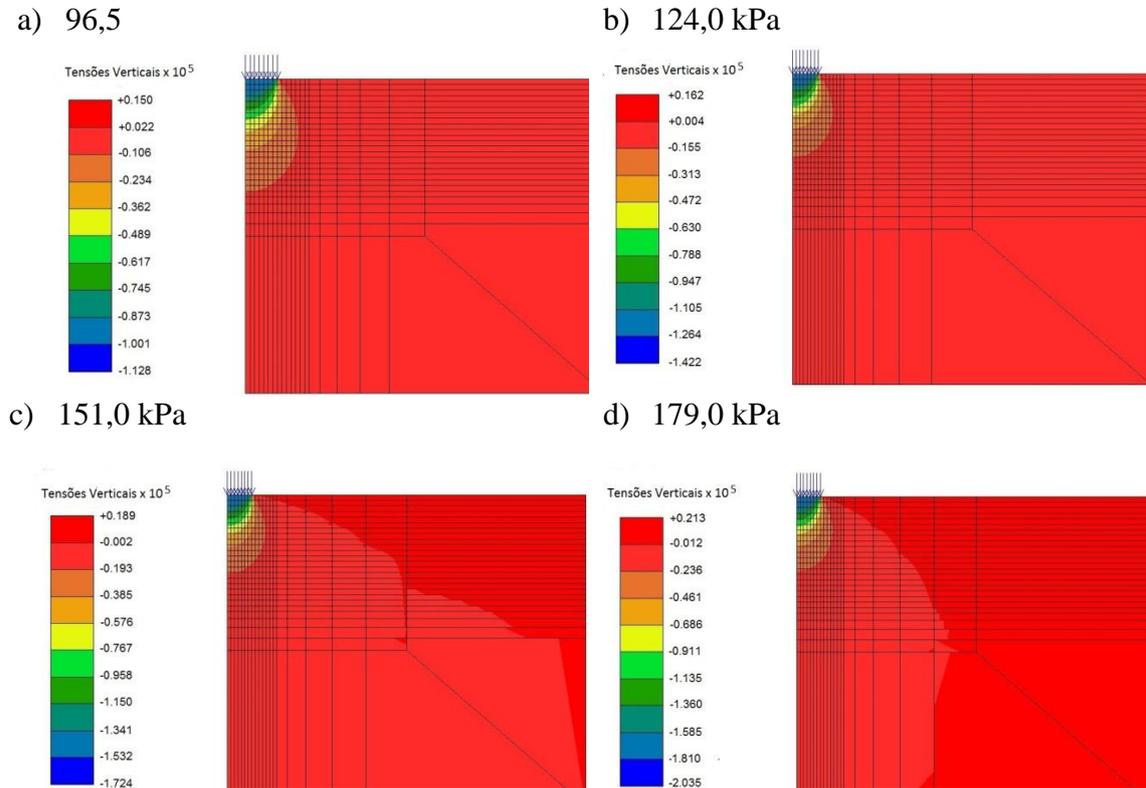


FIGURA 5. Distribuição das tensões verticais para cada pressão de pneu investigada: 96,50 kPa (a); 124,0 kPa(b); 151,0 kPa(c); 179,0 kPa(d). Vertical tension distribution for each tire pressure: 96.50 kPa (a); 124.0 kPa (b); 151.0 kPa(c); 179.0 kPa (d).

A Figura 6 ilustra a variação da tensão vertical nas profundidades estudadas em função da pressão dos pneus. Nessa figura, pode observar-se que, para pressão interna do pneu de 96,5 kPa, a tensão na superfície do solo foi 55,7% maior que a obtida a 0,35m de profundidade. Comparando-se as demais pressões a 0,35 m com as da superfície do solo, foram encontrados valores que variaram de 61,3; 61,2 e 55,4% para as pressões de 124,0; 151,0 e 179,0 kPa, respectivamente. Estes resultados concordam com observações realizadas por KELLER & ARVIDSSON (2004), concluindo que o efeito da distribuição da tensão no solo reduz com o aumento da profundidade.

WAY & KISHIMOTO (2004) mostraram que a tensão na área de contato pneu-solo não é uniformemente distribuída e que a tensão máxima pode ser muito maior do que a inflação dos pneus. Entretanto, essa relação está abaixo dos valores encontrados por BURT et al. (1979), quando as tensões encontradas na interação pneu-solo, ao longo da seção transversal do pneu e do perfil do solo, não foram uniformes, com valores de pico que variaram de 4 a 5 vezes a pressão interna do pneu.

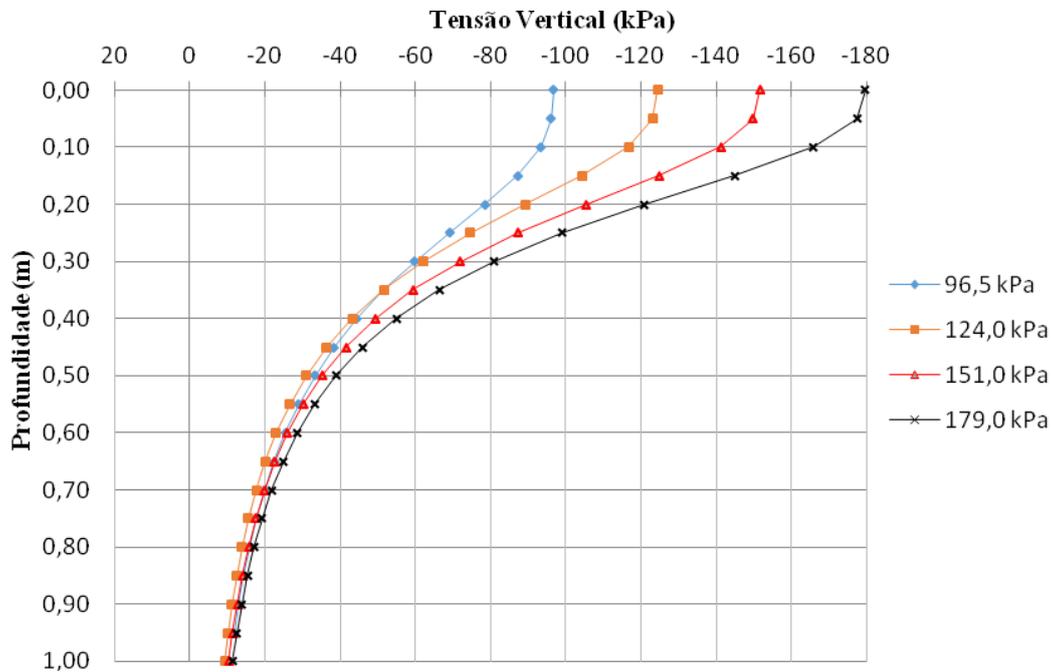


FIGURA 6. Variação da tensão vertical nas profundidades estudadas em função da pressão dos pneus. **Vertical tension variation at different soil depths as a function of tire pressure.**

Observa-se ainda que, em todas as pressões estudadas, as maiores tensões ocorreram na superfície do solo, devido à proximidade do carregamento, atenuando para as demais profundidades devido à absorção das tensões pelas camadas superficiais do solo. Esse comportamento demonstra que, nas camadas superficiais do solo, a área de contato torna-se um fator importante e, nas camadas subsuperficiais, a carga no eixo é um fator que contribui para aumentar a compactação do solo, corroborando às observações realizadas por ARVIDSSON & KELLER (2004), LAMANDÉ & SCHJONNING (2011a) e LAMANDÉ & SCHJONNING (2011b).

Com o objetivo de avaliar o efeito da variação do módulo de resiliência no deslocamento vertical, as mesmas análises realizadas anteriormente foram feitas diminuindo o valor do módulo para 30 MPa. O resultado obtido (Figura 7) evidencia que, quando o valor do módulo decresce, o deslocamento vertical aumenta. Isto é esperado, uma vez que módulos menores tornam a estrutura do solo mais flexível, causando maior afundamento. Deve-se ressaltar que as tensões não variam com o módulo, pois as análises realizadas foram do tipo linear elástica.

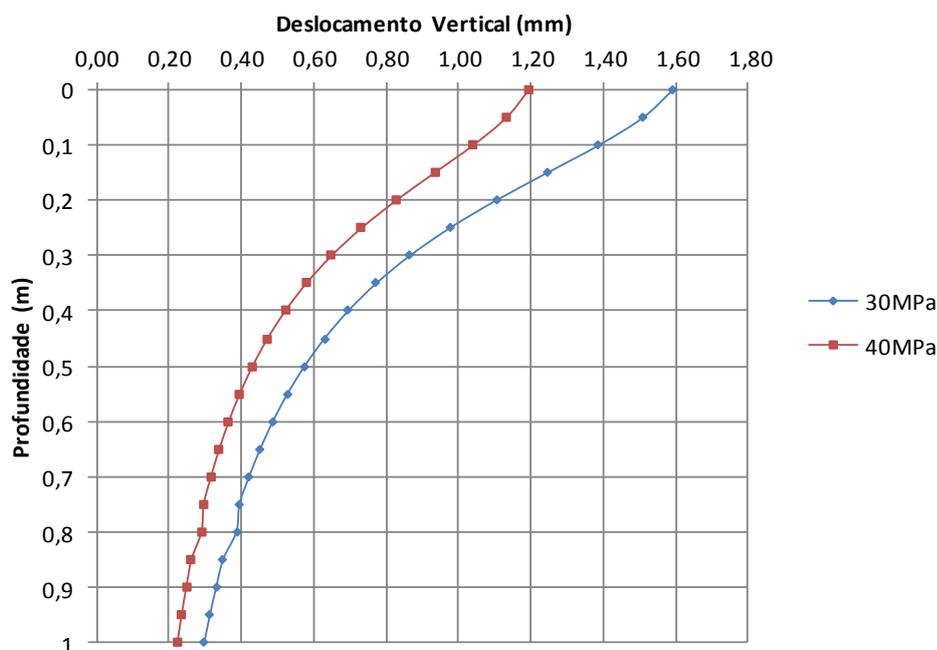


FIGURA 7. Variação do deslocamento vertical com a profundidade para dois módulos diferentes.
Vertical displacement variation with soil depth for two different moduli.

CONCLUSÕES

As tensões verticais encontradas na superfície do solo foram aproximadamente iguais às pressões de inflação dos pneus. A menor pressão provocou a menor tensão no solo, demonstrando a importância da redução das pressões na diminuição da compactação do solo até profundidades de 0,30 m. As maiores pressões causaram as maiores deformações no solo provocadas pela diminuição da área de contato pneu/solo.

Ficou evidente neste estudo que é necessário buscar soluções para reduzir as pressões de trabalho de forma a causar menor compactação superficial do solo devido às tensões verticais e horizontais.

REFERÊNCIAS

ABU-HAMDEH, N.H., REEDER, R.C. Measuring and predicting Stress Distribution under Tractive Devices in Undisturbed Soils. **Biosystems Engineering**, London, v.85, n.4, p.493–502, 2003.

ANSORGE, D.; GODWIN, R.J. The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction: Part 1: Single Axle Studies. **Biosystems Engineering**, London, v.98, n.1, p.115-126, 2007.

ANSORGE, D.; GODWIN, R.J. The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction - Part 2: Multi-axle machine studies. **Biosystems Engineering**, London, v.99, n.3, p.338-347, 2008.

ARAÚJO, A.F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará**. 2009. 175 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

ARAÚJO-JÚNIOR, C.F.; DIAS JÚNIOR, M. S. Modelagem das tensões verticais aplicadas ao solo por um trator cafeeiro para predição da compactação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. **Anais...**

- ARVIDSSON, J., KELLER, T. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. **Soil Tillage Research**, New York, v.77, p.85-95. 2004.
- AUTODESK. Manual de referência AutoCad 2000. Autodesk, 2000.
- BASTOS, J.B.S.; HOLANDA, A.S.; BARROSO, S.H.A. A influência da variação da umidade na análise de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 16., 2012, Porto de Galinhas. **Anais...** Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 2012. v.1.
- BATHE, K.J. **Finite element procedures**. New Jersey: Prentice Hall. 1996. 509p.
- BIRIS, S.S., MAICAN, E., PARASCHIV, G., VLADUT, V., BUNGESCU, S. A model for prediction of stress state in soil below agricultural tyres using the finite element method. **Science Bulletin**, Taipei, v.69, n.4, p.19-28, 2007.
- BURT, E.C.; BAILEY, A.C.; PATTERSON, R.M.; TAYLOR, J.H. Combined effects of dynamic load and travel reduction on tire performance. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, n.1, p.40-45, 1979.
- CAVALCANTE, R.N.A.; COUTINHO, R.P.; HOLANDA, A.S.; PARENTE JÚNIOR, E. **Gerador de malha bidimensional para análise de tensões e deformações em pavimentos asfálticos**. In: IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 2008, Maceió, Book of Abstracts, p.1-18.
- COOK, R.D.; MALKUS, D.S.; PLESHA, M.E.; WITT, R.J. **Concepts and applications of finite element analysis**, 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002. 359p.
- COUTINHO, R. P.; CAVALCANTE, R. N. A.; HOLANDA, A. S.; PARENTE JÚNIOR, E. Desenvolvimento de um gerador de malhas para análise de pavimentos pelo método dos elementos finitos. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 22., 2008. Fortaleza. **Anais...**
- DISERENS, E. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. **Soil Tillage Research**, New York, v.103, p.302–309, 2009.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 134 Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- HOLANDA, A.S.; PARENTE JÚNIOR, E.; ARAÚJO, T.D.P.; MELO, L.T.B.; EVANGELISTA JÚNIOR, F.E.; SOARES, J.B. Finite element modeling of flexible pavements. In: IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 27, 2006, Belém. **Anais...**
- HU, Y. K.; ABEELS, P. F.J. Agricultural tire deformation in the 2D case by finite element metodes. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v.31, n.6, p.353- 370. 1994.
- 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**, London, v. 92, n.1, p.85-96, 2005.
- KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: Effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil Tillage Research**, New York, v.79, n.2, p.191-206. 2004.
- LAMANDÉ, M.; SCHJONNING, P., The ability of agricultural tyres to distribute the wheel load at the soil-tyre interface. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v.45, p.109-120. 2008.

- LAMANDÉ, M.; SCHJONNING, P. Transmission of vertical stress in a real profile. Part I: Site description, evaluation of the Sohne model, and effect of topsoil tillage. **Soil Tillage Research**, New York, v.114, p.57-70. 2011a.
- LAMANDÉ, M.; SCHJONNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part III: Effect of soil water content. **Soil Tillage Research**, New York, v.114, n.2, p.78-85. 2011b.
- LIMA, J.H.C. **Utilização de resíduo de construção e demolição para pavimentos urbanos da região metropolitana de Fortaleza**. 2008. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- MAZETTO, F.; LANÇAS, K.P.; NAGAOKA, A.K.; NETO, P.C.; GUERRA, S.P.G. Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.750-757. 2004.
- MARQUES, J.M.M.C.; OWEN, D.R.J. Infinite elements in quasi-static materially non-linear problems. **Computers and Structures**, v.18, n.4, p.739-751. 1984.
- MCDONALD, T.P.; STOKES, B.J.; AUST, W.M. **Soil physical property changes after skidder traffic**. Southern Forest Experiment Station, Auburn: 1995.
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed., Rio de Janeiro: Ed. Imagemaker Interactive, 2005.
- MIALHE, L.G. O estado da arte e perspectivas da utilização de rodados pneumáticos de baixa pressão na área agrícola. In: ENCONTRO SOBRE PNEUS DE ALTA FLUTUAÇÃO E BAIXA PRESSÃO NAS ÁREAS AGRÍCOLA E FLORESTAL, 1993, Piracicaba: ESALQ, 1993. p.1-17. **Anais...**
- MOHSENI MANESH, A.; WARD, S.M. On the move monitoring of soil-tire interaction on soft soil using wireless data acquisition. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v.50, n.6, p. 1919-1925, 2007.
- MOHSENI MANESH, A.; WARD, S.M.; OWENDE, P.O.M., JAVADI, A. Modelling of pneumatic tractor tyre interaction with multi-layered soil. **Biosystems Engineering**, London, v.104, n.2, p.191-198, 2009.
- MONTEIRO, L.A., MASIERO, F.C., LANÇAS, K.P., GUERRA, S.P.S., JESUS, M.G. Avaliação de pneus para carretas transbordo em tanque de solo. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, v.17, n.1, p.7-16, 2010.
- NANKALI, N., NAMJOO, M. AND MALEKI, M. R. Stress Analysis of Tractor Tire Interacting with Soft Soil using Non-linear 2D Finite Element Method. **International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology**, Isfahan, v.5, n.3, p.107-111. 2012.
- PITANGUEIRA, R.L.S.; PARENTE JÚNIOR, E. **Programa para visualização de resultados de análises não-lineares de modelos bidimensionais de elementos finitos**. Disponível em: <<http://www.lmcv.ufc.br/index.php/downloads>>. Acesso em: 18 set. 2012. SCHJONNING, P., LAMANDÉ, M., TOGERSEN, F.A., ARVIDSSON, J., KELLER, T. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. **Biosystems Engineering**, London, v.99, n.1, p.119-133, 2008.
- SCHJONNING, P., LAMANDÉ, M. A note on the vertical stresses near the soil-tyre interface. **Soil Tillage Research**, New York, v.108, p.77-82, 2010.
- SILVA, S. A.T.; VIDAL, P.J. F.; HOLANDA; Á. S., PARENTE JÚNIOR, E. Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos utilizando elementos finitos e infinitos. **Transportes**, Rio de Janeiro, v.21, n.3, p. 5-13, 2013.
- SOHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.39, n.1, p.276-290, 1958.

VANDENBERG, G.E.; GILL, W.R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.5, n.2, p.105-107, 1962.

WALUBITA, L. F.; VEN, F. C. V. Stresses and strains in asphalt-surfacing pavements. In: SOUTH AFRICAN TRANSPORT CONFERENCE-ACTION IN TRANSPORT FOR THE NEW MILLENNIUM, 2000, South Africa.

WAY, T. R.; KISHIMOTO, T. Interface pressures of a tractor drive tyre on structured and loose soils. **Biosystem Engineering**, London, v.87, n.3, p.375-386. 2004.

XIA, K. Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v.48, p.113-123, 2011.

ZHANG, X.; RAKHEJA, S.; GANESAN, R. Estimation of tire-road contact pressure distribution based on non-linear finite element analysis. **International Journal of Vehicle Design**, St Elier, v.8, p.197-217, 2001.