

JACKSON ANTÔNIO BARBOSA

EFEITO DO TRÁFEGO DE RODADOS PNEUMÁTICOS EM PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2002

JACKSON ANTÔNIO BARBOSA

EFEITO DO TRÁFEGO DE RODADOS PNEUMÁTICOS EM PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA EM: 4 de fevereiro de 2000.

Gutemberg Pereira Dias
(Conselheiro)

Moacir de Souza Dias Júnior
(Conselheiro)

Pedro Castro Neto

Haroldo Carlos Fernandes

Luciano Baião Vieira
(Orientador)

À Regilane, minha esposa.
Ao Mateus, meu filho.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de participar do Programa.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Luciano Baião Vieira, pela orientação, pela confiança e pelo auxílio nos momentos necessários.

Ao Professor Gutemberg Pereira Dias, pelo apoio em todas as ocasiões.

Aos meus colegas Cristiano Márcio Alves de Souza e João Paulo A. R. da Cunha, pela participação nos ensaios de campo.

Aos Professores Moacir de Souza Dias Junior, Nilson Salvador e Pedro Castro Neto, pelo auxílio prestado durante as etapas de trabalho na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG.

Aos meus colegas Reginaldo, Geraldo, Marco Kondo e Wellington (Departamento de Ciência do Solo-UFLA), pelo auxílio nos ensaios laboratoriais.

A todos os meus colegas de curso, pela convivência.

Às empresas Pirelli (Sérgio Raminelli) e AGCO (Arci Mendes), pela concessão dos equipamentos utilizados.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta pesquisa.

BIOGRAFIA

Jackson Antônio Barbosa nasceu na cidade de Lavras-MG no dia 30 de abril de 1972.

Em agosto de 1990, ingressou na Universidade Federal de Lavras, em Lavras-MG, no curso de Engenharia Agrícola, onde se graduou em julho de 1995.

Em agosto de 1995, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

Em março de 1998, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Efeitos da compactação nos solos agrícolas	3
2.1.1. Água no solo, ar e calor	3
2.1.2. Resistência mecânica dos solos agrícolas	4
2.2. Fatores que influenciam o grau de compactação dos solos	10
2.2.1. Textura do solo	11
2.2.2. Teor de água no solo	11
2.2.3. Considerações a respeito do maquinário agrícola	12
2.3. Comportamento mecânico do solo	13
2.3.1. Tensões no solo	14
2.3.2. Deformações no solo	16
2.3.3. Relação entre tensão e deformação	18
2.3.4. Tensões aplicadas por rodados pneumáticos	19
2.4. Equipamentos laboratoriais para estudo de tensões em solos agrícolas	22
3. MATERIAL E MÉTODO	24

	Página
3.1. Metodologia geral	24
3.2. Análises de laboratório	32
3.3. Análise estatística	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Caracterização de propriedades físicas e mecânicas do solo ...	32
4.2. Efeito do tráfego na curva de compressão do solo	34
4.2.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg ⁻¹	34
4.2.2. Teor de água no solo de 0,05 kg.kg ⁻¹	49
4.3. Efeito do tráfego na pressão de preconsolidação	63
4.3.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg ⁻¹	63
4.3.2. Teor de água no solo de 0,05 kg.kg ⁻¹	68
4.4. Efeito do tráfego na resistência à penetração do solo	76
4.4.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg ⁻¹	76
4.4.2. Teor de água no solo de 0,05 kg.kg ⁻¹	82
4.5. Relação entre pressão de preconsolidação e resistência à penetração	89
4.6. Efeito do tráfego sobre a resistência ao cisalhamento do solo ..	89
4.6.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg ⁻¹	89
4.6.2. Teor de água no solo de 0,05 kg.kg ⁻¹	95
4.7. Relação entre resistência ao cisalhamento do solo e resistência à penetração	98
4.8. Deformação superficial do solo	102
4.8.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg ⁻¹	102
4.8.2. Teor de água no solo de 0,05 kg.kg ⁻¹	107
5. CONCLUSÕES	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

RESUMO

BARBOSA, Jackson Antônio, D. S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2002. **Efeito do tráfego de rodados pneumáticos em propriedades mecânicas de um argissolo vermelho-amarelo.** Orientador: Luciano Baião Vieira. Conselheiros: Gutemberg Pereira Dias e Moacir de Souza Dias Júnior.

Os tratores agrícolas podem ser considerados a principal fonte de potência para realização das operações mecanizadas necessárias ao ciclo produtivo de uma cultura. Porém, são também responsáveis pela propagação de tensões nos solos agrícolas, podendo causar degradação de sua estrutura devido a condições inadequadas de tráfego e manejo do solo. Este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento de propriedades mecânicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido ao tráfego de um trator agrícola com rodados pneumáticos dos tipos diagonal e radial, em diferentes condições operacionais. As propriedades mecânicas consideradas em estudo foram pressão de preconsolidação, resistência à penetração, tensão cisalhante máxima e deformação superficial do solo. Os ensaios foram realizados em duas condições de teor de água no solo, 0,42 e 0,05 kg.kg⁻¹, referentes aos estados de consistência do solo friável e sólido, respectivamente. Os rodados pneumáticos foram impostos a duas condições de pressão de insuflagem: 168 e 98 kPa e três condições de patinagem: 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Os valores

de pressão de preconsolidação foram obtidos a partir das curvas de compressão das amostras de solo, segundo a metodologia proposta por DIAS JUNIOR (1994). Os valores de resistência à penetração foram obtidos com o uso de um penetrógrafo. Para obtenção dos valores de resistência ao cisalhamento máxima, fez-se uso da curva tensão cisalhante-deformação, em ensaio de cisalhamento direto. Os valores de deformação da superfície do solo foram obtidos pelo uso de um perfilômetro. As amostras de solo para determinação da curva de compressão e da curva-tensão cisalhante-deformação foram obtidas à profundidade de 0,05 m, sendo também esta a profundidade de determinação da resistência à penetração. Os resultados evidenciaram que as propriedades mecânicas avaliadas foram eficientes em caracterizar mudanças no estado de compactação do solo em questão. Não houve diferença significativa entre rodados pneumáticos ao se comparar o tráfego dos mesmos em alterações nas propriedades mecânicas. As propriedades mecânicas foram mais significativamente influenciadas pelo teor de água no solo do que pelas variáveis tipo de rodado, pressão de insuflagem e patinagem. A resistência à penetração apresentou boa correlação com as variáveis pressão de preconsolidação e tensão cisalhante máxima, podendo ser utilizada para prever alterações nessas variáveis, uma vez determinada, em laboratório, a sua correlação.

ABSTRACT

BARBOSA, Jackson Antônio, D. S., Universidade Federal de Viçosa, February, 2002. **Effect on mechanical features of a Red-Yellow Podzolic soil by driving with pneumatic tractor wheels.** Adviser: Luciano Baião Vieira. Committee members: Gutemberg Pereira Dias e Moacir de Souza Dias Júnior.

To carry out mechanized operations in productive culture cycles, agricultural tractors are indispensable. They are, however, also responsible for tensions in agricultural soils, ultimately leading to structure degradation, due to inadequate driving conditions and soil management. This study tried to evaluate mechanical alterations in a Red-Yellow Podzolic soil subjected to tractor driving with air-filled tires (diagonal and radial) in different operational conditions. Mechanical properties taken into consideration were preconsolidation, resistance to penetration, maximum weathering tension, and superficial soil deformation in percolant and solid soil with 0.42 and 0.05 kg.kg⁻¹ soil water content, respectively. The pneumatic wheels were subjected to air pressures of 168 and 98 kPa and three slip rates (0.10, 0.20, and 0.30 m.m⁻¹). Compression graphs based on the soil samples allowed the calculation of preconsolidation pressure values by the methodology proposed by DIAS JUNIOR (1994). Penetration resistance was determined by a penetrometer. The evaluated mechanical features were efficient to characterize alterations in the

compression stage of the studied soil. There was no significant difference between pneumatic wheels when comparing driving on soils with different mechanical features. Soil water content influenced mechanical features more than the wheel type, air pressure, or slip rate. Penetration resistance and the preconsolidation pressure variables as well as maximum weathering tension were well correlated. This can be used to predict alterations in these variables, once their correlation is established, in the laboratory.

1. INTRODUÇÃO

Os tratores agrícolas podem ser considerados a principal fonte de potência para realização das operações mecanizadas, necessárias ao ciclo produtivo de uma cultura. Porém, são também responsáveis pela propagação de tensões nos solos agrícolas, podendo causar degradação de sua estrutura, devido a condições inadequadas de tráfego do conjunto trator–implemento e de manejo do solo.

O tráfego indiscriminado de máquinas nas áreas cultivadas tem sido preocupante, devido à possibilidade de disseminação da compactação, tendo como consequência uma redução na produtividade das áreas com tráfego agrícola intenso.

Alguns procedimentos empíricos foram criados para tentar descrever o processo de compactação dos solos agrícolas (TURNER, 1984; SOANE, 1981; SOEHNE, 1958). Todavia, tais procedimentos empíricos possuem limitações e, por vezes, geraram resultados discordantes das observações realizadas no campo.

Dentro desse contexto, é interessante a realização de um estudo que contemple o conhecimento das propriedades mecânicas dos solos agrícolas e influí no processo de compactação, possibilitando estimar a suscetibilidade à compactação dos solos em diferentes sistemas de manejo, com base no conhecimento de sua capacidade de suporte de carga (DIAS JUNIOR, 1994).

Em vista do exposto, esta pesquisa objetivou avaliar o comportamento de propriedades mecânicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido ao tráfego de um trator agrícola equipado com rodados pneumáticos em diferentes condições operacionais.

As propriedades mecânicas consideradas foram pressão de preconsolidação, resistência à penetração, tensão cisalhante máxima e deformação superficial do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Efeitos da compactação nos solos agrícolas

As propriedades do solo mais afetadas pela compactação são aquelas que controlam o teor e a movimentação de água, ar, nutrientes e transferência de calor, bem como a resistência mecânica do solo.

2.1.1. Água no solo, ar e calor

Os espaços porosos perdidos na compactação são, em sua maioria, os macroporos, mais efetivos na movimentação de água e ar no solo. Quando os macroporos são quebrados, microporos são formados, e estes retêm a água fortemente, permitindo a drenagem de forma lenta.

Com a preponderância de microporos, há a tendência de os solos compactados serem pouco aerados. Em muitos casos, quando as chuvas são abundantes, os sistemas radiculares e microrganismos usam o oxigênio do solo mais rápido do que este possa ser repostado. Essa aeração deficiente limita o crescimento radicular e a atividade microbiana do solo.

Uma das propriedades mais importantes afetadas pela compactação dos solos agrícolas é sua capacidade de transmitir e reter água. A quantidade e transmissão de água são afetadas pelas mudanças no volume, tamanho e formato dos poros (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996; SOANE e VAN

OUWERKERK, 1994; LARSON et al., 1989; GUPTA et al., 1985; ASHBURNER e SIMS, 1984; CAMARGO, 1983).

A compactação superficial do solo faz com que a água proveniente da chuva ou irrigação infiltre a uma taxa menor, proporcionando condições para a formação do escoamento superficial, grande causador de erosão.

A compactação causada pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas de preparo de solo interrompe e torna lento a percolação de água ao longo do perfil do solo, devido à redução na quantidade de macroporos. A retenção de água é alterada devido à modificação na estrutura do solo. Em condições normais, os microporos retêm água, enquanto os macroporos drenam a água e contêm ar.

Segundo CHANCELLOR (1994), solos compactados com predominância de microporos retêm mais fortemente a água, exigindo maior esforço das plantas para utilizá-la, o que reduz a quantidade de água disponível para as culturas nesse tipo de solo.

O que ocorre com a água em linhas gerais é o mesmo que acontece com os gases, principalmente o oxigênio, em seu processo de difusão dentro do solo. A redução do espaço dos macroporos reduz o movimento de gases dentro do perfil do solo, proporcionando condições desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas.

Estudos têm evidenciado que a compactação afeta a transferência de calor dentro do solo pela mudança na densidade deste, nas relações de água no solo e na refletividade da superfície (ASHBURNER e SIMS, 1984; CAMARGO, 1983). A compactação causa aumento na densidade do solo, com conseqüente incremento na condutividade, difusão e capacidade térmica dos solos.

2.1.2. Resistência mecânica dos solos agrícolas

A maioria dos métodos disponíveis para avaliar a compactação dos solos agrícolas baseia-se na comparação da densidade do solo. Medidas de resistência a penetração e manifestações biológicas da planta também têm sido usadas como indicadores do nível de compactação. Vários autores utilizaram a resistência à penetração do solo para avaliar os efeitos do sistema

de manejo sobre o ambiente radicular (TORMENA e ROLOFF, 1996; BENGHOUGH e MULLINS, 1990).

Com o objetivo de estudar a influência do teor de água no solo e da densidade deste sobre a resistência à penetração, KLEIN et al. (1998) coletaram amostras de solo com estrutura indeformada em diferentes condições de uso, sendo a resistência do solo à penetração determinada em laboratório. Os resultados indicaram que pequenas variações no teor de água no solo proporcionam variações acentuadas em resistência à penetração.

A facilidade e rapidez na obtenção dos resultados, além da possibilidade de maior número de repetições, são as principais vantagens do uso do penetrômetro. No entanto, a dependência dos resultados em relação ao teor de água no solo e de sua densidade dificulta sua interpretação.

Diversos pesquisadores têm feito uso da curva de compressão do solo para avaliar sua suscetibilidade à compactação (KONDO e DIAS JUNIOR, 1999; DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996; DIAS JUNIOR, 1994; LARSON e GUPTA, 1980; LARSON et al., 1980). Porém, deve-se ressaltar a importância do conhecimento referente ao histórico de carregamento superficial do solo, o qual tem influência sobre sua resistência mecânica.

Quando o solo não sofreu carregamento superficial, a relação entre tensão aplicada e deformação do solo apresenta comportamento teoricamente linear (a aplicação de qualquer tensão resulta em deformação não-recuperável (LARSON et al., 1980)). Uma vez que este mesmo solo tenha sido submetido a condições de carregamento superficial (tráfego de tratores e, ou, máquinas agrícolas, por exemplo), a variação de tensões pode resultar em deformações recuperáveis, ou não-recuperáveis, em razão da intensidade de carga aplicada e da resistência oferecida pelo solo.

O solo pode apresentar comportamento elástico ou plástico, em razão da tensão aplicada e de sua capacidade de suporte de carga. A pressão de preconsolidação indica o ponto de separação entre as zonas de deformações pequenas e recuperáveis (comportamento elástico) e de deformações não-recuperáveis (comportamento plástico). Para que não ocorra compactação adicional do solo (KONDO e DIAS JUNIOR, 1999), deve-se evitar a aplicação de pressões superiores à pressão de preconsolidação.

Um ponto importante com relação à pressão de preconsolidação, de certa forma negligenciada no passado, mas levada em consideração nos dias atuais, é sua correlação direta com o teor de água no solo (DIAS JUNIOR, 1994).

Diversos pesquisadores (McNABB e BOERSMA, 1993; BINGNER e WELLS, 1992; LEBERT e HORN, 1991) estimaram, pela regressão linear múltipla, a pressão de preconsolidação, usando propriedades físicas e mecânicas dos solos. Porém, existem poucos modelos que estimem a pressão máxima suportada pelo solo sem ocorrência de compactação adicional, para diferentes teores de água no solo, com base na pressão de preconsolidação. A maioria dos modelos tem dado ênfase à reta de compressão virgem, que define deformações plásticas e não-recuperáveis (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996).

Um modelo de compressibilidade, para solos de clima temperado, que prediz a pressão máxima que o solo pode suportar para diferentes teores de água no solo, sem causar compactação adicional a este, tomando como base a pressão de preconsolidação, foi desenvolvido por DIAS JUNIOR (1994). Modelos semelhantes têm sido encontrados para solos dos Estados de Minas Gerais, do Espírito Santo e da Bahia (KONDO e DIAS JUNIOR, 1999; SILVA et al., 2000; DIAS JUNIOR et al., 1999). A equação 1 representa o modelo proposto por DIAS JUNIOR (1994), relacionando a pressão de preconsolidação ao teor de água no solo.

$$\sigma_p = 10^{(a + bU)} \quad \text{equação 1}$$

em que

σ_p = pressão de preconsolidação (kPa);

U = teor de água no solo (kg.kg^{-1}); e

a e b = parâmetros empíricos, obtidos por meio do ajuste das curvas de regressão.

Para avaliar a suscetibilidade à compactação de dois solos ("Capac Loam" e "Kalamazoo Loam") sob dois sistemas de manejo – preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) –, DIAS JUNIOR (1994) avaliou as pressões de preconsolidação. Os resultados indicaram que, em ambos os

solos, para qualquer condição de teor de água, o sistema de manejo plantio direto apresentou maiores pressões de preconsolidação, comparativamente ao sistema de manejo em sistema convencional.

A condição do manejo plantio direto é mais resistente à compactação, constituindo grande vantagem dos sistemas de plantios conservacionistas (DIAS JUNIOR, 2000).

O efeito do manejo e do teor de água do solo na pressão de preconsolidação de três solos agrícolas foi estudado por KONDO e DIAS JUNIOR (1999), a saber: Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Escuro, em condições de mata natural, cultura anual e pastagem, na região de Lavras, MG. Concluíram que, à medida que o teor de água no solo aumentou, a pressão de preconsolidação decresceu exponencialmente, indicando redução na capacidade de suporte de carga do solo.

Visando obter uma forma alternativa de determinação da pressão de preconsolidação, em condições de campo, DIAS JUNIOR et al. (1999) calibraram os valores da pressão de preconsolidação com os da resistência à penetração (RP), obtidos com o uso de penetrômetro. Dos ensaios de compressão uniaxial, foram obtidas equações de pressão de preconsolidação *versus* teor de água no solo (de forma semelhante à equação 1). Das medidas de resistência à penetração, as quais foram obtidas em laboratório, obtiveram-se as equações de resistência à penetração *versus* teor de água no solo. Uma vez que $\sigma_p = f(U)$ e $RP = f(U)$, obteve-se $\sigma_p = f(RP)$, para diferentes valores de teor de água no solo. A relação σ_p e RP foi da forma $\sigma_p = b_0 + b_1 RP$.

Quando um trator agrícola se desloca sobre um solo, são exercidas na interface rodado–solo ações verticais, cuja magnitude depende da capacidade de suporte de carga do solo; e ações tangenciais, que possibilitam que o rodado desenvolva tração, segundo sua capacidade de suportar a tensão tangencial (cisalhante) aplicada.

A capacidade de suporte ao cisalhamento de um solo é proporcional à carga vertical aplicada, sendo aceito, de forma geral, o critério de ruptura de Coulomb (equação 2).

$$H = A.c + W.tg\phi$$

equação 2

em que

H = força horizontal de ruptura (kN);

A = área de contato rodado–solo (m²);

c = coesão do solo (kN.m⁻²);

W = carga vertical sobre o rodado (kN); e

tg ϕ = tangente do ângulo de atrito interno do solo (°).

A determinação da coesão e do ângulo de atrito interno do solo se faz em laboratório, com o uso de equipamentos como prensa de cisalhamentos direto e triaxial. Para prever o comportamento de um veículo em terreno natural, realizam-se ensaios *in situ* com placas retangulares ou anéis de corte com diferentes cargas verticais, inserindo a placa no terreno ou girando o anel até que o solo se rompa. Assim, obtêm-se as curvas tensão–deformação, para as condições de cargas normal e tangencial ao solo.

Nos solos friccionais, a tensão cisalhante alcança um valor máximo para deformação relativamente pequena para, depois, descender e estabilizar. Nos solos coesivos, pode não existir o pico e a curva crescer continuamente para passar, sem interrupção, de um comportamento elastoplástico para plástico.

Em um experimento para avaliar o estado de tensão induzido a um solo agrícola classificado como "Norfolk Sandy Loam", WIERMANN et al. (1999) avaliaram o efeito da carga dinâmica e do número de passadas nas tensões e deformações impostas ao solo. Três diferentes cargas dinâmicas foram aplicadas ao solo, em duas passadas: em um nível constante de velocidade de avanço de 0,15 m.s⁻¹ e patinação do rodado de 10%. Pôde-se observar que a razão entre a tensão cisalhante e a tensão normal média aumentaram significativamente quando ocorreu a segunda passada do rodado. Esse aumento foi basicamente devido ao da tensão cisalhante. Os referidos autores citaram que os valores de tensão apresentados são valores subestimados, devido aos deslocamentos vertical e horizontal dos sensores.

Para avaliar a tensão cisalhante imposta por um rodado pneumático 18,4 R 38 em solo agrícola, WOOD et al. (1991) realizaram testes em condições de

solo compactado e solto, com quatro níveis de cargas dinâmicas impostas ao rodado. As informações obtidas evidenciaram que o rodado desenvolveu tensões cisalhantes, ao longo da largura de contato, de forma mais uniforme em solo solto, comparativamente à condição de solo compactado. Um aumento em carga dinâmica resultou também em aumento significativo da tensão cisalhante no centro da garra. Maiores níveis de tensões cisalhantes foram obtidos em solo compactado, comparativamente ao solo solto.

Em estudo conduzido por WAY et al. (1995), transdutores de estado de tensão foram instalados em dois tipos diferentes de solos agrícolas, com a finalidade de avaliar o comportamento do estado de tensões imposto aos solos, como função da altura das garras de um rodado pneumático de uso agrícola. O experimento foi montado no "National Soil Dynamics Laboratory", Auburn, Al, USA. Os solos utilizados foram: "Norfolk Sandy Loam", contendo 71,6% de areia, 17,4% de silte e 11% de argila; teor de água médio no perfil de 6,6%; densidade de $1,235 \text{ Mg.m}^{-3}$; índice de cone de 0,567 MPa e "Decatur Clay Loam Soil", contendo 26,9% de areia, 43,4% de silte e 29,7% de argila; teor de água médio no perfil de 12,7%; densidade de $1,171 \text{ Mg.m}^{-3}$; e índice de cone de 0,872 MPa. Três transdutores de estado de tensão foram instalados em diferentes profundidades, para medir as tensões abaixo do rodado. Os resultados de WAY et al. (1995) possibilitaram a conclusão de que, nas condições experimentais impostas, não houve efeito da altura das garras na distribuição de tensões no solo.

A instalação de transdutores de estado de tensão tridirecional em garras de um rodado agrícola foi feita por JUN et al. (1998), com o objetivo de avaliar a distribuição de tensões transversais nas garras. Os transdutores foram instalados em três distintas posições, sendo extremidade interna, extremidade externa e ponto intermediário entre as duas. O rodado foi operado em duas condições de carga dinâmica (9,3 e 14,2 kN) e duas condições de pressão de insuflagem (59 e 157 kPa). Os dados do estudo de JUN et al. (1998) foram coletados na caixa de solo pertencente à "Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine", Obihiro, Japão. Como resultados, JUN et al. (1998) concluíram que aumentos de carga dinâmica e de pressão de insuflagem elevaram os níveis de tensão; o padrão de distribuição de tensões refletiu, com maior significância, o efeito da pressão de insuflagem, comparativamente à

carga dinâmica; a máxima tensão normal ocorreu próxima à extremidade interna do rodado, quando o mesmo se encontrava em condição de alta pressão de insuflagem; e a máxima tensão tangencial aconteceu próxima à extremidade interna do rodado, reduzindo-se no sentido da extremidade externa.

Com o objetivo de avaliar as tensões impostas a um solo agrícola, em diferentes profundidades, SUMALI et al. (2000) projetaram e testaram uma lâmina de aço atuando no solo de forma vertical. “Strain Gauges” foram montados na parte posterior da lamina, registrando as deformações durante seu deslocamento.

Para validar a relação sinal de saída *versus* tensão aplicada ao sensor, obtida em laboratório, SUMALI et al. (2000) montaram experimento em solo “Silty Clay Loam” não trabalhado. Quatro passadas de 10 m foram realizadas, com a lâmina de aço se deslocando à velocidade de 1 km.h⁻¹. Leituras de resistência à penetração também foram realizadas.

Uma das informações de maior interesse do trabalho de SUMALI et al. (2000) são os mapas de resistência mecânica do solo. Esses mapas possibilitam determinar, com grande exatidão, a profundidade em que ocorre um grau de compactação prejudicial ao desenvolvimento cultural, bem como a distribuição dessa compactação em determinada área. Como resultados, esses autores concluíram que o sistema de determinação de tensões desenvolvido apresentou desempenho satisfatório quando se compararam valores de campo com os determinados em laboratório; observou-se que a resistência do solo à penetração apresentou boa correlação com a resistência imposta à lamina de aço ($R^2 = 0,95$).

2.2. Fatores que influenciam o grau de compactação dos solos

O grau de compactação de um solo agrícola é função de fatores externos e internos (DIAS JUNIOR, 2000). Os fatores externos são caracterizados por tipo, intensidade e frequência da carga aplicada, enquanto os fatores internos são influenciados por história de tensão, teor de água no solo, textura do solo, estrutura do solo, densidade inicial do solo e teor de

carbono no solo. Dentre os parâmetros referentes ao solo, merecem destaque a textura e o teor de água.

2.2.1. Textura do solo

Independentemente da classe textural, os solos serão compactados em algum grau devido à aplicação de uma pressão externa sobre determinada condição de teor de água (RAGHAVAN et al., 1977). Esse grau de compactação pode ou não ser suficiente para afetar o crescimento das plantas ou a movimentação da água no perfil do solo.

Um solo que contenha uma mistura uniforme de areia, silte e argila será compactado e terá menor porosidade e maior densidade quando comparado com um solo que contenha partículas de tamanhos semelhantes (CHANCELLOR, 1994).

Segundo LARSON e ALLMARAS (1971), a distribuição de partículas que teoricamente representaria o mais compactável dos solos seria representada por 67% de areia, 24% de silte e 9% de argila. Essa proporção foi verificada por meio de testes de compactação de solos de diferentes texturas. Solos com argilas expansivas são geralmente mais resistentes à compactação do que aqueles que contêm argila não-expansiva (HARRIS, 1971).

2.2.2. Teor de água no solo

O teor de água no solo é o parâmetro que tem maior influência na sua suscetibilidade à compactação. A uma pressão constante, a densidade do solo aumenta com a elevação do teor de água, porque a água contida entre as partículas sólidas age como lubrificante (HARRIS, 1971), contribuindo para que as partículas possam se rearranjar mais facilmente do que numa condição de menor teor de água.

Em maiores teores de água no solo, a densidade sofre decréscimo, porque os poros restantes estão cheios de água, que não pode ser drenada rapidamente. Dessa forma, sendo a água incompressível, a densidade do solo tende a diminuir.

Com o objetivo de estudar o efeito de diferentes sistemas de manejo na densidade do solo máxima e na umidade crítica de compactação, FIGUEIREDO et al. (2000) realizaram um experimento em Latossolo Roxo submetido aos seguintes sistemas de manejo: arado de discos, escarificador, semeadura direta, arado de aivecas e grade aradora. A partir das curvas de compactação, obteve-se a densidade do solo máxima. Os valores de $D_{s_{max}}$ e U_{crit} , em distintos sistemas de manejo, época de coleta e profundidade, não foram estatisticamente diferentes. Observou-se, ainda, que a U_{crit} correspondeu a 90% do limite de plasticidade e 90% da água retida a $-0,01$ MPa e foi aproximadamente igual à água retida a $-0,033$ MPa.

O monitoramento do teor de água de um solo e a sua correlação com a capacidade de suporte de carga são a chave para se determinar a faixa na qual ele pode ser trabalhado. Em geral, quanto menor o teor de água, maior potência é requerida para o preparo do solo, mas a suscetibilidade do solo à compactação tende a ser menor.

2.2.3. Considerações a respeito do maquinário agrícola

Os tratores agrícolas têm a função primordial de fornecer potência a máquinas e implementos agrícolas, com a ressalva de que a tração na barra se caracteriza como a forma mais usual de aproveitamento de potência. Os principais elementos responsáveis pela transformação de potência do motor em potência de tração são os mecanismos de tração (esteiras ou rodados pneumáticos). Porém, são esses mecanismos os responsáveis pela aplicação de pressões externas ao solo; da intensidade dessas pressões depende o nível de compactação dos solos.

Uma das maneiras de se reduzir o problema de compactação sob os rodados é o uso de rodados duplos, mas tal procedimento não elimina a compactação. Em primeiro lugar, a redução de pressão na superfície não é diretamente proporcional ao acréscimo na largura. Isso ocorre porque há certa adição dos efeitos de compactação de um rodado sobre o outro (TURNER et al., 1997).

De maneira geral, rodados duplos podem reduzir alguns problemas, assim como rodados de baixa pressão, mas eles não podem resolver

definitivamente o problema da compactação. A compactação sob rodados duplos será menor em profundidade, mas maior em extensão superficial, já que a área afetada é também maior (SHELL et al., 1997).

Para avaliar as alterações no estado de compactação de um solo, OLIVEIRA et al. (1997) usou a densidade do solo e a profundidade do sulco resultante de três diferentes números de passadas de um trator agrícola. Utilizaram uma, três e cinco passadas do trator sobre o mesmo lugar. Antes e depois da entrada do trator na área, foram coletadas amostras entre 0 e 0,50 m de profundidade, a cada 0,05 m, utilizando um anel volumétrico para determinação da densidade do solo e teor de água. Observou-se que a densidade do solo depois de cada passada sempre foi igual ou superior à densidade do solo medida antes, tendendo a ter valores mais próximos com o aumento da profundidade.

A velocidade de operação é um importante fator na determinação da intensidade de compactação produzida por dada operação agrícola. Quanto maior o tempo de contato do implemento com o solo, maior o efeito compactante, devido ao fato de a mudança das fases sólida, líquida e gasosa ser tempo dependente (HORN e LEBERT, 1994).

Segundo DAVIES et al. (1972), a patinagem dos rodados tem igual ou maior importância na compactação dos solos, em comparação com o efeito das cargas dinâmicas aplicadas sobre os rodados. Estudos da compactação dos solos pelos rodados pneumáticos indicaram que nem toda pressão que produz a compactação pode ser explicada pela geometria do rodado e por propriedades do solo. As forças de cisalhamento produzidas pela patinagem dos rodados devem ser incluídas.

2.3. Comportamento mecânico do solo

As forças que são aplicadas aos solos em operações agrícolas são geralmente de curta duração, sendo aplicadas sobre pequena área de carregamento e cargas de pequena intensidade. Deve-se considerar, ainda, que as características mecânicas dos solos agrícolas variam entre classes de solos e, em se tratando de um mesmo solo, de acordo com a sua consistência.

A dinâmica dos solos agrícolas é uma área da mecânica dos solos agrícolas que trata do conhecimento das forças e momentos no solo causados pelas operações de preparo e tráfego de máquinas.

Em uma visão prática, esse conhecimento pode ser aplicado na correta escolha de implementos, pneus e máquinas, de forma a racionalizar o consumo energético das operações agrícolas. No campo da pesquisa científica, especialmente nas áreas de Engenharia Agrícola e Ciência do Solo, tal conhecimento pode facilitar a avaliação do preparo e do tráfego em relação ao sistema de produção e às condições do solo; isso pode ser de especial importância na interpretação de experimentos de campo. Já no campo industrial, o conhecimento da dinâmica dos solos agrícolas pode ser aplicado ao projeto de equipamentos que interajam com os solos agrícolas, de forma a otimizar sua eficiência.

2.3.1. Tensões no solo

Segundo BLOCK et al. (1994), a compactação do solo geralmente é causada pela propagação de tensões, em consequência das forças aplicadas na superfície.

O estado de tensões em um ponto é uma maneira de descrever as forças em um meio semi-infinito como os solos. Apesar de, em escala macroscópica, o solo não poder ser considerado um meio contínuo, as teorias da mecânica do contínuo podem ser aplicadas, uma vez que se assume a continuidade da superfície do solo pela suposição de que, por mais pequena que seja, sempre será maior do que o tamanho dos poros que contém.

Se um plano imaginário passa através de um corpo sólido, o material em um lado do plano exerce uma força no material do outro lado. Se uma pequena área ΔA contendo um ponto é selecionada no plano, o vetor soma das forças que atuam nessa área pode ser determinado. O limite do quociente entre ΔF e ΔA , quando este último tende a zero, é denominado vetor de tensões (T), o qual é associado ao plano (KOOLEN, 1996).

$$T = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{F}{\Delta A} \quad \text{equação 3}$$

Para o limite ter significado físico, a área deve ser contínua. O vetor de tensões T é usualmente dividido em um componente normal ao plano (F_n) e um componente tangencial ao plano (F_t). Se outro plano passar através do mesmo ponto, um diferente vetor de tensões será determinado.

Uma vez que um número infinito de planos pode passar através do ponto, um método é requerido para calcular o vetor de tensões em qualquer plano. Para um perfeito entendimento das tensões em um ponto, torna-se necessária a utilização de um conceito tridimensional, com a ressalva de que nove tensões representam uma entidade, isto é, por definição matemática, um tensor.

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \text{equação 4}$$

em que

T = matriz referente ao tensor de tensões em um ponto infinitesimal de solo;

σ_x = tensão normal atuando perpendicularmente ao plano ZY;

σ_y = tensão normal atuando perpendicularmente ao plano ZX;

σ_z = tensão normal atuando perpendicularmente ao plano XY;

τ_{xy} e τ_{xz} = tensões cisalhantes atuando paralelamente ao plano ZY;

τ_{yx} e τ_{yz} = tensões cisalhantes atuando paralelamente ao plano ZX; e

τ_{zx} e τ_{zy} = tensões cisalhantes atuando paralelamente ao plano XY.

Por simetria e equilíbrio, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ e $\tau_{zy} = \tau_{yz}$. Dessa forma, seis valores independentes devem ser especificados para descrever o estado de tensões em um ponto no solo.

É possível encontrar um sistema de referência em que o valor das tensões cisalhantes da matriz seja zero. As direções dos eixos desse sistema denominam-se direções principais, e as tensões recebem o nome de tensões principais. A tensão de maior valor denomina-se tensão principal maior, a de

menor valor denomina-se tensão principal menor e a de valor intermediário denomina-se tensão principal intermediária.

Uma vez conhecidas as três direções principais, pode-se considerar um elemento octaédrico, no qual a tensão em que se encontra submetido se decompõe em uma tensão normal e em uma tensão cisalhante, as quais recebem o nome de tensões octaédricas (KOOLEN, 1996).

$$\sigma_{\text{oct}} = \frac{1}{3} * (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_m \quad \text{equação 5}$$

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} * \left(\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \right) \quad \text{equação 6}$$

A matriz de tensões pode decompor-se em outras duas matrizes, sendo uma dessas referente à matriz de tensões médias e, a outra, à matriz desviatória.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{bmatrix} \quad \text{equação 7}$$

A primeira matriz está associada a mudanças de volume, enquanto a segunda o está a mudanças de forma.

A matriz de tensões relativa a um sistema de coordenadas conhecido é uma completa descrição do estado de tensões em um ponto considerado. Isso significa que as tensões em qualquer direção podem ser calculadas.

2.3.2. Deformações no solo

Toda força aplicada ao solo produz nele uma reação que consiste em deformação, deslocamento, cisalhamento ou esses fenômenos ao mesmo tempo. O estado de deformações em um ponto do solo é definido pela seguinte matriz de deformações:

$$D = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad \text{equação 8}$$

em que

D = matriz referente ao tensor de deformações em um ponto infinitesimal de solo;

ε_x = deformação normal atuando perpendicularmente ao plano ZY;

ε_y = deformação normal atuando perpendicularmente ao plano ZX;

ε_z = deformação normal atuando perpendicularmente ao plano XY;

γ_{xy} e γ_{xz} = deformações cisalhantes atuando paralelamente ao plano ZY;

γ_{yx} e γ_{yz} = deformações cisalhantes atuando paralelamente ao plano ZX; e

γ_{zx} e γ_{zy} = deformações cisalhantes atuando paralelamente ao plano XY.

As propriedades da matriz de deformações são análogas às da matriz de tensões. Da mesma forma, é possível definir um sistema de referência em três direções, tal que a deformação experimentada pelo ponto seja linear. As deformações lineares denominam-se deformações principais.

A matriz de deformações pode ser decomposta em outras duas matrizes.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_m & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y - \varepsilon_m & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z - \varepsilon_m \end{bmatrix} \quad \text{equação 9}$$

em que

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{3}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad \text{equação 10}$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2} \quad \text{equação 11}$$

2.3.3. Relação entre tensão e deformação

Tanto a matriz de tensões quanto à de deformações são variáveis que dependem do tempo. Descrever a reação do solo a uma força externa aplicada à superfície requer estabelecer as equações matemáticas que relacionam as tensões no solo com as deformações que produzem. Os procedimentos usados para sua determinação consistem em medir, simultaneamente, as variáveis, estabelecendo, assim, expressões matemáticas que as relacionem entre si. Genericamente, essa relação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x(t) & \tau_{xy}(t) & \tau_{xz}(t) \\ \tau_{yx}(t) & \sigma_y(t) & \tau_{yz}(t) \\ \tau_{zx}(t) & \tau_{zy}(t) & \sigma_z(t) \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \varepsilon_x(t) & \gamma_{xy}(t) & \gamma_{xz}(t) \\ \gamma_{yx}(t) & \varepsilon_y(t) & \gamma_{yz}(t) \\ \gamma_{zx}(t) & \gamma_{zy}(t) & \varepsilon_z(t) \end{bmatrix} \quad \text{equação 12}$$

A relação entre tensão e deformação faz-se com a utilização das teorias da elasticidade. O princípio básico dessa teoria é admitir que cada um dos componentes da matriz de tensões é uma função linear dos componentes da matriz de deformações. Os parâmetros do solo que caracterizam a relação tensão–deformação são o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν). As equações 13, 14 e 15 relacionam deformação e tensão fazendo uso dos parâmetros citados.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \text{equação 13}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad \text{equação 14}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad \text{equação 15}$$

Tendo em conta essas últimas relações, a matriz de tensões em um ponto do solo se decompõe em outras duas matrizes (equação 16).

As aplicações da teoria da elasticidade para representar a relação entre as tensões aplicadas e as deformações produzidas são muito limitadas, pois o comportamento dos solos não é elástico.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \begin{bmatrix} \epsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_m \end{bmatrix} + \frac{E}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} \epsilon_x - \epsilon_m & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \epsilon_y - \epsilon_m & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \epsilon_z - \epsilon_m \end{bmatrix} \quad \text{equação 16}$$

2.3.4. Tensões aplicadas por rodados pneumáticos

A principal causa da compactação dos solos agrícolas é o tráfego de tratores e máquinas, sendo, em sua maioria, montados sobre rodados pneumáticos. Quando um rodado se desloca sobre uma superfície são geradas tensões perpendiculares e tangenciais à superfície. Essas tensões, denominadas ainda tensões normal e cisalhante, são transmitidas à massa de solo, a partir da área de contato rodado-solo.

O desenvolvimento de relações empíricas que permitam o projeto de rodados mais eficientes pode ser conseguido a partir de um melhor entendimento das tensões e forças que atuam na interface rodado-solo (WOOD e BURT, 1987).

No passado, a pressão média aplicada à área de contato rodado-solo era assumida como igual à pressão de insuflagem do rodado, o que, na verdade, não ocorre, pois se deve considerar também o efeito da rigidez da carcaça.

Um método para estimar a pressão de contato média, a partir da pressão de insuflagem, foi proposto por KOOLEN e KUIPERS (1983), expresso pela equação 17.

$$P_m = k.p_{ins} \quad \text{equação 17}$$

em que

P_m = pressão de contato média (kPa);

K = fator determinado pelo número de lonas do rodado; e

P_{ins} = pressão de insuflagem do rodado (kPa).

O valor de k pode ser de 1,1 para rodados de quatro lonas e 1,25 para rodados de 16 lonas.

Uma limitação da equação 17 é que a mesma foi desenvolvida para rodados defletindo em uma superfície rígida, em condições de carga estática. Não foram considerados parâmetros de solo e carga dinâmica, usualmente encontrados no campo.

Devido à complexidade encontrada para se medir a área de contato rodado–solo em condições dinâmicas, a mesma foi considerada sob condições estáticas.

Outros autores citaram metodologias com a determinação da pressão de contato média igual à carga suportada pelo rodado e à área de contato do mesmo (OLIVEIRA et al., 1997). Em condições dinâmicas, isso não ocorre, pois se deve considerar o efeito das garras, as quais normalmente apresentam maiores valores de pressão, comparativamente à área entre as garras, bem como o efeito da deformação superficial do solo.

Uma relação para estimar a pressão média de contato na superfície rodado–solo foi proposta por STEINER e SOHNE (1979), expressa pela equação 18.

$$P_m = 2,677 + 0,575 \cdot p_{ins} + 0,011 \cdot W_d - 0,016 \cdot d \quad \text{equação 18}$$

em que

P_m = pressão de contato média (bar);

P_{ins} = pressão de insuflagem do rodado (bar);

W_d = carga dinâmica no rodado (kN); e

d = diâmetro externo do rodado (cm).

Em se tratando de compactação de solos agrícolas, devem ser consideradas não apenas as pressões médias que atuam na área de contato, mas também as pressões máximas possíveis de ocorrência.

Em condições dinâmicas, tem-se diferenciação quanto à distribuição de pressões, tanto no sentido transversal quanto no longitudinal, sendo essa distribuição também dependente da resistência mecânica oferecida pelo solo. SOEHNE (1958) relatou três relações que distribuem as pressões transversais na interface rodado–solo, em função da máxima pressão aplicada ao solo e da sua resistência mecânica (equações 19, 20 e 21).

A equação 19 é válida para solos que oferecem alta resistência mecânica, secos e com alta densidade.

$$P_{ij} = P_{\max} \left[1 - \frac{d_{ij}^{16}}{R^{16}} \right], \text{ se } v \leq 4,5 \quad \text{equação 19}$$

em que

P_{ij} = pressão na interface rodado–solo, considerando-se a posição ij (kPa);

P_{\max} = máxima pressão produzida pelo rodado, descrita pela expressão $1,25 \cdot P_m$, (kPa);

R = metade da largura do rodado (m);

δ_{ij} = distância do centro do rodado ao ponto de incremento de pressão (m); e

v = fator de concentração.

A equação 20 é válida para solos densos úmidos, para o qual $P_{\max}=1,5 \cdot P_m$.

$$P_{ij} = P_{\max} \left[1 - \frac{d_{ij}^4}{R^4} \right], \text{ se } 4,5 < v < 5,5 \quad \text{equação 20}$$

Finalmente, para solos muito úmidos ou soltos, a equação 21 pode ser utilizada, considerando-se $P_{\max}=2 \cdot P_m$.

$$P_{ij} = P_{\max} \left[1 - \frac{d_{ij}^2}{R^2} \right], \text{ se } v \geq 5,5 \quad \text{equação 21}$$

De acordo com SOEHNE (1958), o fator de concentração pode variar de 4 a 6, dependendo da densidade do solo. A equação 22 determina o fator de concentração de solos agrícolas.

$$? = 6 - 2 \left[\frac{\rho - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \right] \quad \text{equação 22}$$

em que

ρ = densidade do solo (Mg.m^{-3});

ρ_{\max} = densidade do solo máxima (Mg.m^{-3}); e

ρ_{\min} = densidade do solo mínima (Mg.m^{-3}).

2.4. Equipamentos laboratoriais para estudo de tensões em solos agrícolas

Os testes que caracterizam a resistência mecânica dos solos agrícolas podem ser classificados em testes de estabilidade diretos e indiretos. No Quadro 1, apresentam-se métodos de determinação da resistência mecânica dos solos agrícolas em condições de laboratório, onde a compactação dos solos se refere à compressão de pequenas amostras de solo, podendo estas ser indeformadas ou deformadas.

Quadro 1 – Métodos para determinação da resistência mecânica dos solos

Método	Parâmetro medido	Derivada	Condição da amostra
Ensaio de estabilidade de agregados	diâmetro médio dos agregados (cm)	-	indeformada
Limites de consistência	teor de água (kg.kg^{-1})	-	deformada
Ensaio normal de compactação	teor de água (kg.kg^{-1}) e densidade do solo (Mg.m^{-3})	-	deformada
Ensaio de compressão uniaxial	tensão (kPa)	pressão de preconsolidação (kPa)	deformada ou indeformada
Ensaio triaxial	tensão (kPa)	coesão (kPa), ângulo de atrito interno ($^{\circ}$)	deformada ou indeformada
Ensaio de cisalhamento direto	tensão (kPa)	coesão (kPa), ângulo de atrito interno ($^{\circ}$)	deformada ou indeformada
Penetrometria	resistência à penetração (kPa)	índice de cone (kPa)	indeformada

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Metodologia geral

Este estudo foi conduzido em um Argissolo Vermelho-Amarelo localizado no "Campus" da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, com latitude de 20°45'20" sul, longitude de 42°52'40" oeste e altitude média de 650 m.

Os resultados das análises físicas do solo, realizadas no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da UFV, são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Resultado da análise física do solo

Parâmetro analisado	Valor obtido	Unidade
Teor de argila	0,68	kg.kg ⁻¹
Teor de areia	0,15	kg.kg ⁻¹
Teor de silte	0,17	kg.kg ⁻¹
Limite de liquidez	0,57	kg.kg ⁻¹
Limite de plasticidade	0,42	kg.kg ⁻¹
Limite de contração	0,28	kg.kg ⁻¹
Índice de friabilidade	0,14	kg.kg ⁻¹
Densidade do solo	1,32	Mg.m ⁻³
Densidade de partículas	2,73	Mg.m ⁻³

Média de três repetições.

A área onde foi instalado o experimento era usada pelo Setor de Produção da UFV, estando em pousio por dois anos. Dois meses antes da instalação do experimento, a área foi subsolada, eliminando 60% da cobertura vegetal.

Os ensaios ocorreram em duas condições de teor de água no solo, sendo $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$ ($\pm 5\%$) e $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$ ($\pm 2\%$). Esses valores correspondem a 95 e 5% do teor de água à capacidade de campo, respectivamente.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial $2 \times 2 \times 3$, com quatro repetições, perfazendo um total de 48 unidades experimentais. Os tratamentos constituíram-se dos seguintes níveis de fatores:

- Dois tipos de rodados pneumáticos agrícolas, sendo rodados de configuração diagonal e de configuração radial.
- Duas pressões de insuflagem dos rodados, sendo 168 e 98 kPa.
- Três níveis de patinagem dos rodados.

Cada parcela experimental foi trafegada por um trator agrícola Massey Ferguson 5290¹ (Anexo 1). O trator foi operado com rodados diagonais PIRELLI TM 95 18,4-32 no eixo traseiro e PIRELLI TM 95 14,9-24 no eixo dianteiro e rodados radiais PIRELLI TM 700 510/70 32 no eixo traseiro e PIRELLI TM 200 14,9 R 24 no eixo dianteiro (Anexo 2). Os rodados foram inflados a 98 e 168 kPa de pressão, em função do delineamento experimental.

Foram impostas cargas à barra de tração pela adoção de um “trator de frenagem” Valmet 110 (Anexo 1), com o objetivo de obter patinagens dos rodados de $0,10$ ($\pm 25\%$), $0,20$ ($\pm 25\%$) e $0,30$ ($\pm 25\%$) m.m^{-1} . Na Figura 1, mostra-se o “comboio de ensaio”, composto pelo trator Massey Ferguson 5290 montado com rodados radiais, sendo “freado” pelo trator Valmet 110.

Para cada condição de teor de água no solo, tipo de rodado pneumático, respectiva pressão de insuflagem e patinagem dos rodados motrizes, o trator agrícola deslocou-se por 40 m, em segunda marcha reduzida e 1.750 rpm de rotação do motor. A rotação e marcha do trator de frenagem foram alteradas para obtenção dos diferentes níveis de patinagem.

¹ A citação de marcas e, ou, modelos não implica recomendação pelo autor.



Figura 1 – Comboio de ensaio utilizado.

Durante o tráfego, foram coletados dados referentes à força na barra de tração (Figura 2), à patinação dos rodados dianteiro e traseiro (Figura 3) e ao consumo de combustível do trator (Figura 4).

Ao final de cada ensaio e no solo trafegado pelos rodados dianteiro e traseiro direito, foram coletadas amostras de solo indeformadas e deformadas, para determinação de propriedades físicas e mecânicas. A amostragem foi realizada na profundidade de 0 – 0,05 m, com três repetições. Também, foram determinadas a resistência à penetração e a deformação causada na superfície do solo pelo tráfego, utilizando-se perfilômetro (Figura 5).

3.2. Análises de laboratório

Os ensaios de compressão uniaxial e cisalhamento direto foram realizados no Laboratório de Física do Solo pertencente à Universidade Federal de Lavras.

Para caracterização do solo antes do tráfego, simularam-se diferentes teores de água no solo, utilizando amostras indeformadas e inicialmente saturadas, as quais foram secadas ao ar, no laboratório, até a obtenção do teor



Figura 2 – Célula de carga e mostrador digital para medição de força na barra de tração.

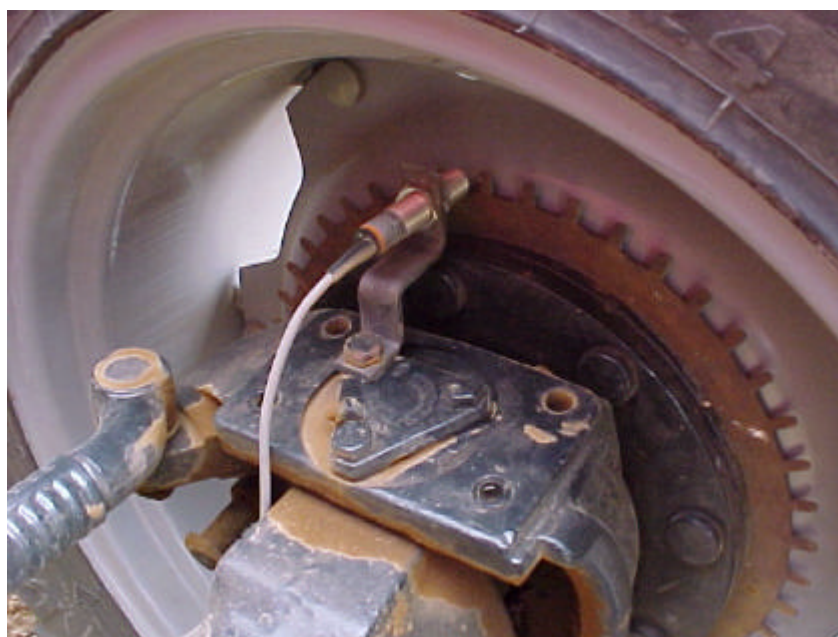


Figura 3 – Sensor de pulsos para medição do número de voltas dos rodados.



Figura 4 – Sistema utilizado para medição do consumo de combustível.



Figura 5 – Coleta das variáveis resistência à penetração (penetrógrafo) e deformação do solo (perfilômetro).

de água desejado, com três repetições (KONDO, 1998; KONDO e DIAS JUNIOR, 1999a; KONDO e DIAS JUNIOR, 1999b). Em seguida, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, usando-se um consolidômetro da marca BOART Longyear, cuja aplicação das pressões se faz por meio da utilização de ar comprimido (Figura 6). As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, sendo cada uma aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada, e só então aplicou-se uma nova pressão (TAYLOR, 1948).



Figura 6 – Consolidômetro pneumático BOART Longyear (Departamento de Ciência do Solo – Universidade Federal de Lavras).

Após cada ensaio, a curva de compressão do solo foi obtida, plotando-se a pressão aplicada no eixo das abscissas *versus* densidade do solo ao final de cada estágio de aplicação de determinada pressão, no eixo das ordenadas.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em amostras indeformadas, usando-se uma prensa de cisalhamento da marca ELE INTERNATIONAL (Figura 7). Os ensaios foram realizados a uma velocidade



Figura 7 – Prensa para cisalhamento direto (Departamento de Ciência do Solo – Universidade Federal de Lavras) e amostra de solo cisalhada (ROCHA e DIAS JUNIOR, 2000).

constante de avanço da máquina de 2 mm.s^{-1} e tensão normal aplicada à amostra de 150 kPa para amostras com teor de água de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$ e 500 kPa para amostras com teor de água de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$. A coleta de dados ocorreu a cada 30 segundos. Após cada ensaio, a curva de cisalhamento do solo foi obtida, plotando-se a deformação horizontal da amostra no eixo das abscissas *versus* tensão cisalhante no eixo das ordenadas.

3.3. Análise estatística

A análise estatística constou de comparação das equações de regressão das curvas de compressão secundárias do solo, após a linearização, usando-se o procedimento sugerido por SNEDECOR e COCHRAN (1989). Para as variáveis pressão de preconsolidação, tensão cisalhante máxima, resistência à penetração e deformação do solo, realizou-se análise de variância, em que cada combinação de níveis de fatores foi estimada por um intervalo de confiança, seguindo-se a distribuição t, de Student, no nível de probabilidade de 95%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização de propriedades físicas e mecânicas do solo

Nas Figura 8, mostram-se as curvas de compressão obtidas no ensaio de compressão uniaxial para cinco condições de teor de água no solo. Os valores de 0,42 e 0,33 kg.kg⁻¹ encontram-se dentro da faixa que caracteriza o estado de consistência do solo como semi-sólido. Os valores de 0,23, 0,14 e 0,05 kg.kg⁻¹ encontram-se no estado de consistência sólido.

Observou-se que a curva de compressão do solo tendia à linearidade à medida que aumentava o teor de água, concordando com as afirmações de DIAS JUNIOR e PIERCE (1996), SILVA et al. (1999) e CASTRO NETO (2001).

Na Figura 9, mostram-se os valores de pressão de preconsolidação obtidos a partir das curvas de compressão do solo e submetidos à análise de regressão de acordo com o modelo proposto por DIAS JUNIOR et al. (1999), da forma $\sigma_p = f(U)$.

Os limites de consistência (LC e LP) caracterizam a faixa de friabilidade do solo, recomendada para operações de tráfego e movimentação da massa de solo, por proporcionar melhor desempenho operacional de máquinas e implementos agrícolas. Porém, deve-se atentar para o fato de que a capacidade de suporte de carga do solo pode apresentar valores oscilando entre 149 e 300 kPa dentro dessa mesma faixa, indicando a necessidade de correlação entre a carga aplicada por veículos e, ou, máquinas agrícolas e a capacidade de suporte de carga do solo.

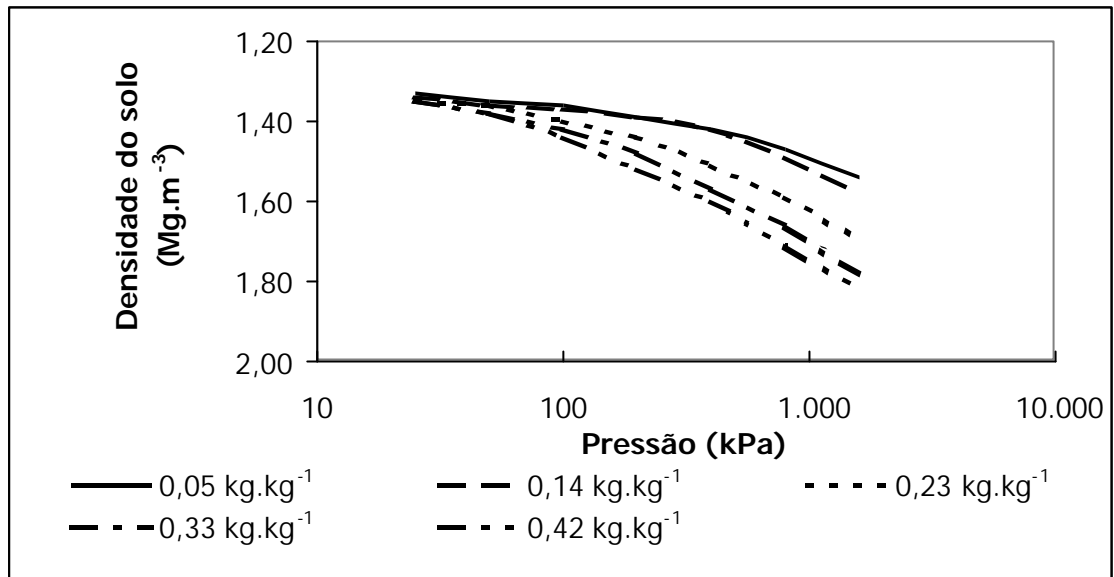
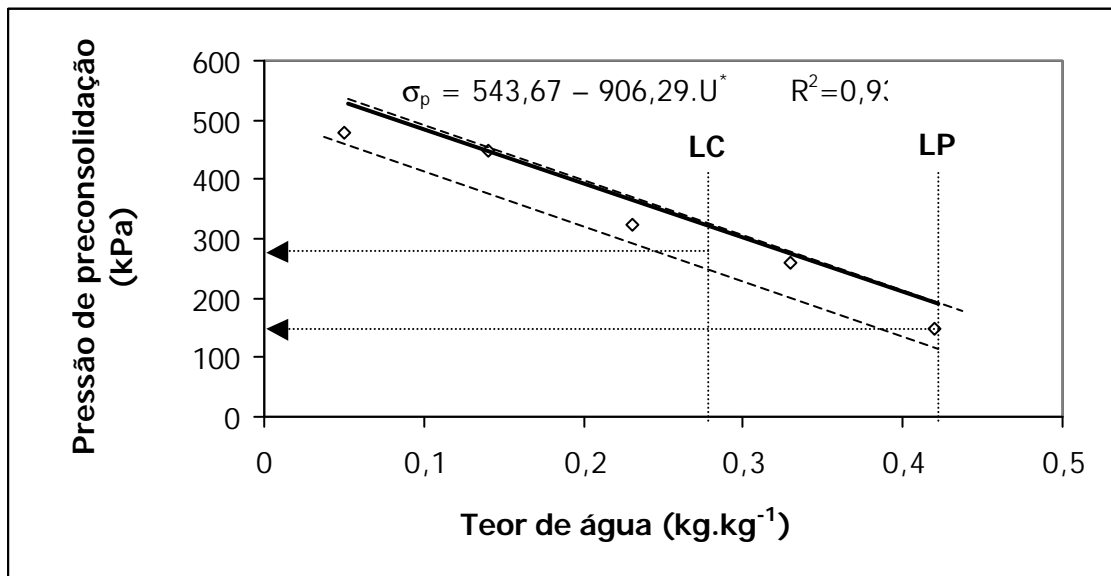


Figura 8 – Curvas de compressão para diferentes teores de água no solo. Cada curva expressa a média de três amostras.



* Significativo pelo teste T a 5% de probabilidade

Figura 9 – Pressão de preconsolidação em função do teor de água no solo antes do tráfego.

4.2. Efeito do tráfego na curva de compressão do solo

4.2.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg⁻¹

A curva de compressão de um solo é composta por duas partes, a curva de compressão virgem e a curva de compressão secundária (LARSON et al., 1980), sendo esta última associada a deformações recuperáveis. A aplicação de pressões maiores do que a pressão de preconsolidação e o posterior descarregamento promovem um deslocamento da curva de compressão secundária para regiões de maior densidade do solo.

Com a finalidade de testar o efeito do tráfego nas curvas de compressão secundárias, estas foram comparadas, após a linearização, utilizando-se o procedimento proposto por SNEDECOR e COCHRAN (1989).

A Figura 10 ilustra o efeito do tráfego do trator Massey Ferguson 5.290 acoplado com rodados diagonais, com pressão de insuflagem de 168 kPa, para os níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Observou-se que todas as condições de tráfego tiveram efeito em deslocar as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.

Observa-se, no Quadro 3, que, para qualquer condição de patinagem dos rodados dianteiro e traseiro, o comportamento das curvas de compressão secundárias foram diferentes estatisticamente. A inclinação da curva de compressão secundária, após a linearização, reflete a capacidade de recuperação das deformações que ocorrem na fase elástica. Em todos os níveis de patinagem, o rodado dianteiro não alterou, de forma significativa, a inclinação das curvas de compressão secundárias. O mesmo não ocorreu para o rodado traseiro, o que acarretou aumento da densidade do solo, sendo isso evidenciado pelo deslocamento da curva de compressão secundária para regiões de maiores densidades do solo (Figura 10).

No que se refere ao intercepto das curvas com o eixo das ordenadas, o qual reflete a significância ou não do aumento em densidade do solo, observou-se que todas as condições de patinagem impostas pelo rodado aumentaram, de forma significativa, seu valor (Quadros 3 e 5).

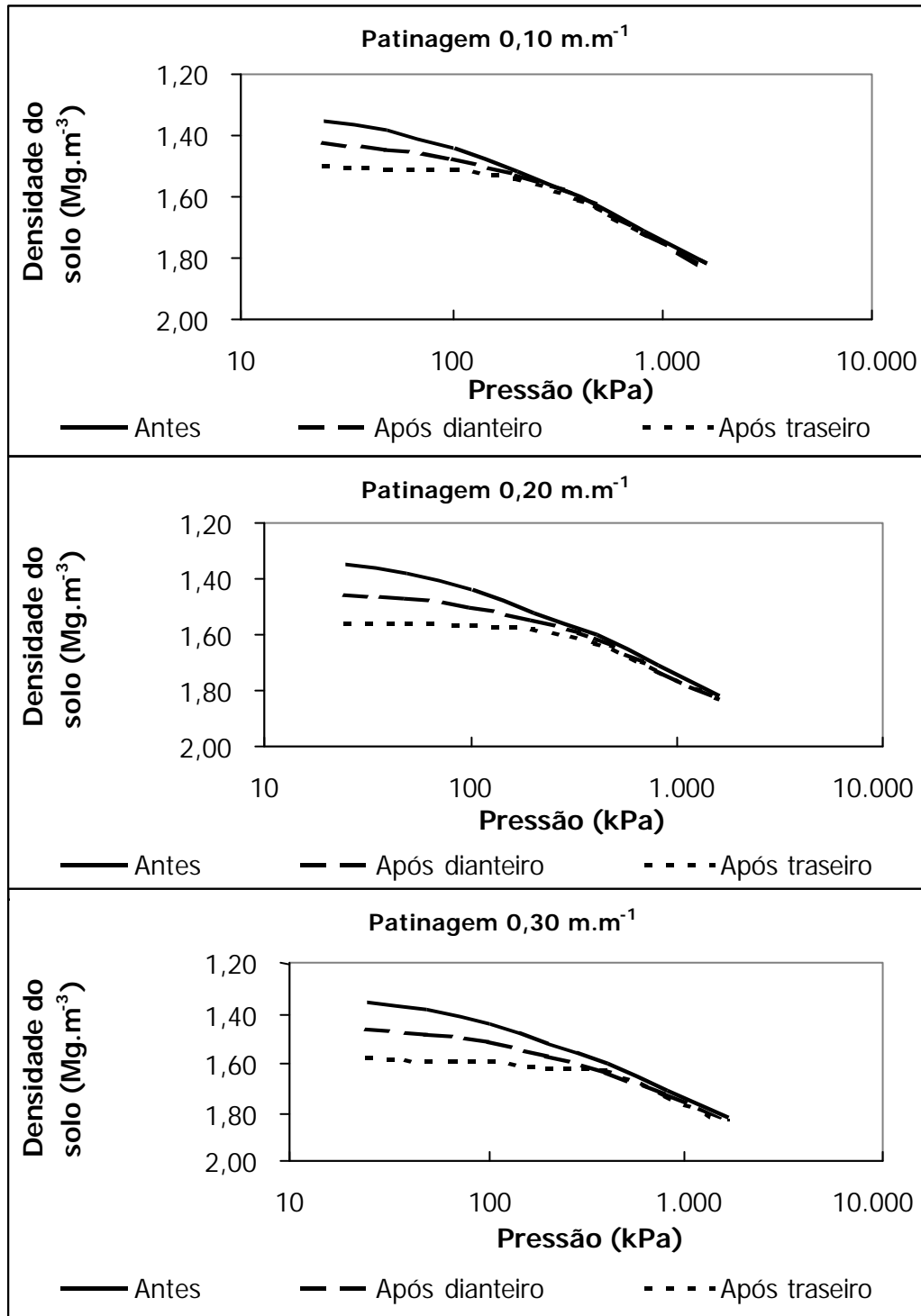


Figura 10 – Curvas de compressão das amostras de solo com teor de água de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$ e trator acoplado com rodados diagonais com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

Quadro 3 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego dos rodados diagonais com 168 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 3,60 ^{ns} 7,70 [*]
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 8,00 [*] 25,75 ^{**}
0,20	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	0,90 ^{ns} 2,12 ^{ns} 14,60 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 4,50 [*] 18,21 ^{**}
0,30	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	0,90 ^{ns} 2,32 ^{ns} 30,30 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 5,32 [*] 13,6 ^{**}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

No Quadro 4, mostra-se o efeito da patinagem do rodado, em que as equações para patinagens de 0,20 e 0,30 m.m⁻¹ não diferiram estatisticamente entre si, não ocorrendo o mesmo ao se compararem as patinagens de 0,10 e 0,20.

No Quadro 5, evidencia-se que todas as condições de patinagem dos rodados alteraram, de forma significativa, a densidade do solo, com a ressalva de que patinagens de 0,30 e 0,20 m.m⁻¹ não diferiram estatisticamente entre si. Já as patinagens de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹ apresentaram diferença significativa.

Quadro 4 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado diagonal traseiro com 168 kPa de pressão de insuflagem

Curvas comparadas		Valor de F
Rodado traseiro a 0,30 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,09 ^{ns}
	Intercepto	2,33 ^{ns}
Rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,10 m.m ⁻¹	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,13 ^{ns}
	Intercepto	4,98 ^{**}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 5 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados diagonais com 168 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^C
0,10	Após rodado dianteiro	1,46 ^B
	Após rodado traseiro	1,48 ^B
0,20	Após rodado dianteiro	1,50 ^A
	Após rodado traseiro	1,52 ^A
0,30	Após rodado dianteiro	1,54 ^A
	Após rodado traseiro	1,56 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 11, mostram-se as curvas de compressão obtidas das amostras de solo com teor de água de 0,42 kg.kg⁻¹ e pressão de insuflagem de 98 kPa. Em todas as condições de tráfego, observou-se deslocamento das curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.

No Quadro 6, mostra-se a comparação entre as equações de regressão das curvas de compressão secundárias, após a linearização, para a condição de rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem e patinagens dos rodados de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Observou-se que o comportamento das

b

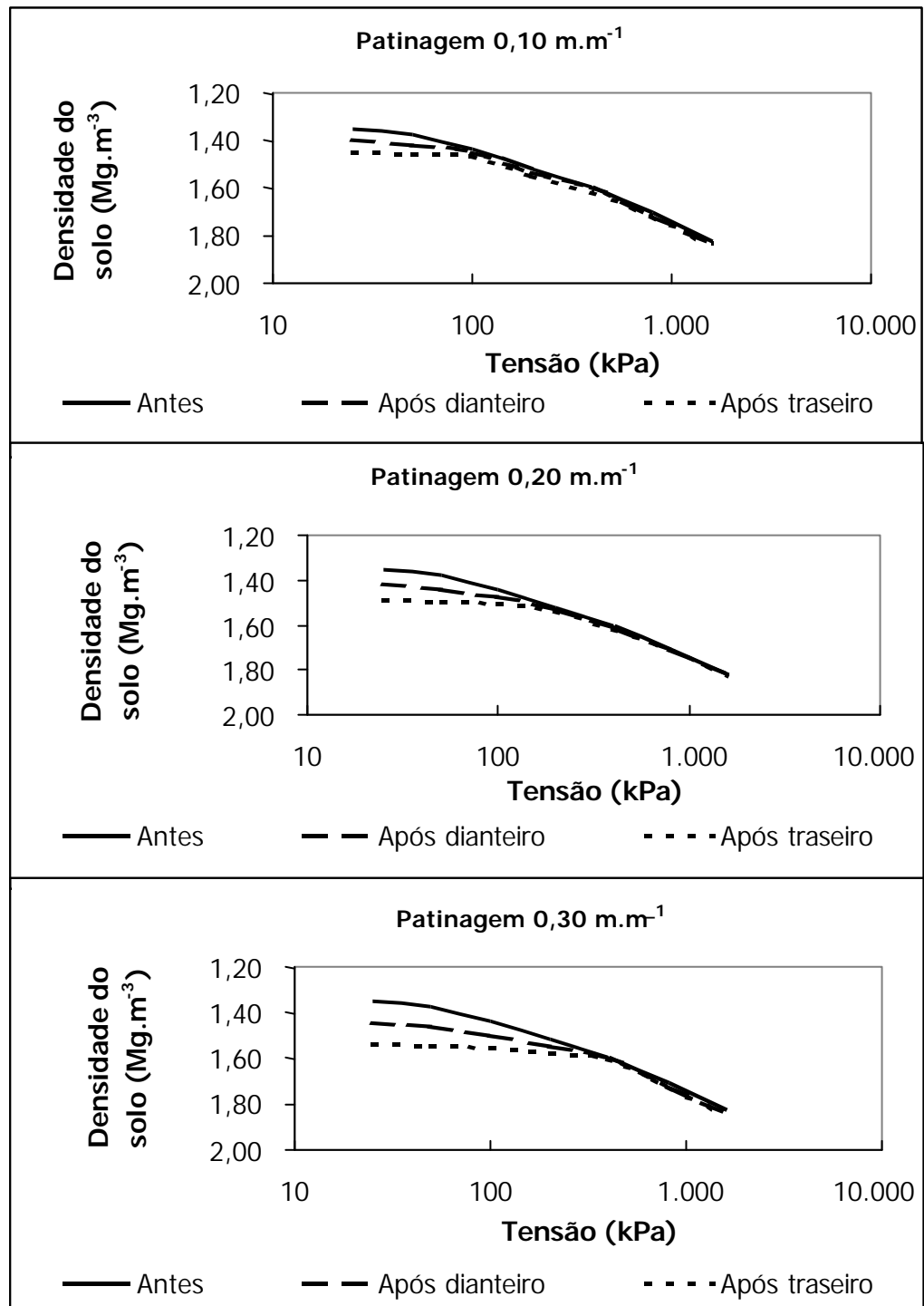


Figura 11 – Curvas de compressão das amostras de solo com teor de água de 0,42 kg.kg⁻¹ e trator acoplado com rodados diagonais com 98 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

Quadro 6 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinação ($m.m^{-1}$)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 0,7 ^{ns} 2,7 ^{ns}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 2,19 ^{ns} 8,83 ^{**}
0,20	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	0,90 ^{ns} 1,41 ^{ns} 5,60 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 5,97 [*] 17,59 ^{**}
0,30	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	0,90 ^{ns} 2,03 ^{ns} 13,16 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	0,90 ^{ns} 6,92 [*] 40,64 ^{**}

** Significativo ($P < 0,01$), * Significativo ($P < 0,05$) e ns Não-significativo ($P > 0,05$), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

curvas diferiram estatisticamente pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989), exceto na condição após rodado dianteiro a $0,10 m.m^{-1}$ de patinação.

O rodado dianteiro não alterou, de maneira significativa, a inclinação das curvas de compressão secundárias, para todas as condições de patinação impostas. Após o tráfego do rodado traseiro, observou-se que a $0,10 m.m^{-1}$ não houve diferença estatisticamente significativa para a inclinação da curva de compressão secundária, já para as condições de $0,20$ e $0,30 m.m^{-1}$ se verificou diferença entre inclinações (Quadro 6).

No que se refere ao intercepto com o eixo das ordenadas, exceto para a condição de rodado dianteiro a $0,10 m.m^{-1}$ de patinação, todas as demais condições de patinação foram diferentes (Quadro 6).

No Quadro 7, mostra-se a comparação das curvas de compressão secundárias, para as patinagens impostas. Observa-se, nesse quadro, que as patinagens de 0,30 e 0,20 m.m⁻¹ diferem estatisticamente entre si, não ocorrendo o mesmo nas patinagens de 0,20 e 0,10 m.m⁻¹.

Quadro 7 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado diagonal traseiro com 98 kPa de pressão de insuflagem

Curvas comparadas		Valor de F
Rodado traseiro a 0,30 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,03 ^{ns}
	Intercepto	7,02 [*]
Rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,10 m.m ⁻¹	Equação	0,80 ^{ns}
	Inclinação	0,75 ^{ns}
	Intercepto	2,05 ^{ns}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

As alterações obtidas em densidade do solo após o tráfego dos rodados, em suas diferentes condições de patinagem, são representadas no Quadro 8. A 0,10 m.m⁻¹ de patinagem, não ocorreu diferença significativa ao se compararem as condições antes e depois do rodado dianteiro, já as demais condições alteraram, de forma significativa, a densidade do solo. A 0,10 e 0,20 m.m⁻¹ de patinagem, houve diferença significativa ao se comparar o tráfego do rodado dianteiro com o do traseiro. A 0,30 m.m⁻¹ de patinagem, não houve diferença entre os rodados.

No Quadro 9, comparam-se as curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado traseiro, para as condições de trator acoplado com rodado diagonal com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem. Nesse quadro, observa-se que as equações das curvas de compressão secundárias foram diferentes. A inclinação não apresentou diferença significativa, enquanto o intercepto exibiu diferença significativa ao se compararem as pressões de insuflagem, em todos as patinagens impostas.

Quadro 8 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados diagonais com 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^C
0,10	Após rodado dianteiro	1,43 ^C
	Após rodado traseiro	1,44 ^B
0,20	Após rodado dianteiro	1,46 ^B
	Após rodado traseiro	1,48 ^A
0,30	Após rodado dianteiro	1,49 ^A
	Após rodado traseiro	1,53 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quadro 9 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado diagonal traseiro com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	168 x 98	Equação	0,8 ^{ns}
		Inclinação	1,09 ^{ns}
		Intercepto	5,41 [*]
0,20	168 x 98	Equação	1,0 ^{ns}
		Inclinação	0,30 ^{ns}
		Intercepto	10,15 ^{**}
0,30	168 x 98	Equação	1,0 ^{ns}
		Inclinação	0,03 ^{ns}
		Intercepto	4,36 [*]

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Em todas as condições de tráfego, notou-se que os valores de densidade do solo se alteraram de forma significativa (Quadro 10). Para patinagens de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹, não houve diferença significativa entre pressões de insuflagem, enquanto para a patinagem de 0,20 m.m⁻¹ se observou diferença entre pressões.

Quadro 10 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego de rodados diagonais com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^C
0,10	Diagonal traseiro 98 kPa	1,44 ^B
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,49 ^B
0,20	Diagonal traseiro 98 kPa	1,48 ^B
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,55 ^A
0,30	Diagonal traseiro 98 kPa	1,53 ^A
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,57 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A Figura 12 ilustra o efeito do tráfego do trator Massey Ferguson 5290 acoplado com rodados radiais, com pressão de insuflagem de 168 kPa, nos níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Observa-se, nessa figura, que todas as condições de tráfego tiveram efeito em deslocar as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.

No Quadro 11, mostra-se a comparação entre as curvas de compressão secundárias, após a linearização, para a condição de trator acoplado com rodados radiais, a 168 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. De forma análoga às condições anteriores, observou-se diferença estatisticamente significativa de comportamento entre as curvas de compressão secundárias. O tráfego dos rodados dianteiro e traseiro não alterou, de forma significativa, a inclinação das curvas. Para todas as condições de tráfego, verificou-se diferença entre interceptos.

Ao comparar os níveis de patinagem (Quadro 12), notou-se que entre os níveis de 0,30 e 0,20 m.m⁻¹ não ocorreu diferença significativa entre equações; já na comparação entre 0,20 e 0,10 m.m⁻¹, isso foi observado.

O efeito do tráfego sobre a densidade do solo é apresentado no Quadro 13, no qual se observa que todas as condições de tráfego alteraram, de forma significativa, seu valor. Nas patinagens de 0,10 e 0,30 m.m⁻¹, não se verificou diferença significativa ao comparar os rodados dianteiro e traseiro, ocorrendo diferença na comparação desses rodados na patinagem de 0,20 m.m⁻¹.

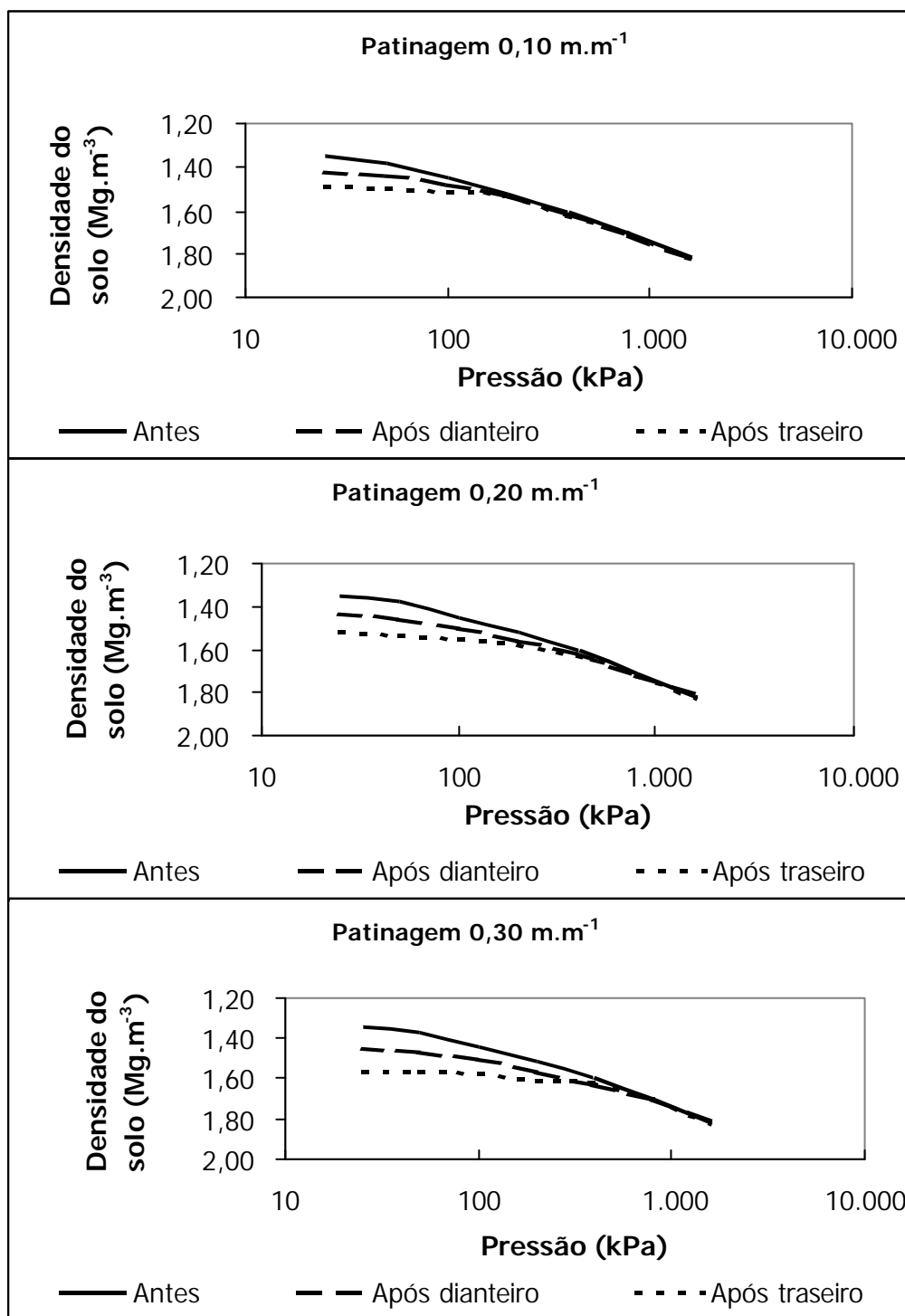


Figura 12 – Curvas de compressão das amostras de solo com teor de água de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$ e trator acoplado com rodados radiais com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

Quadro 11 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego dos rodados radiais com 168 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m⁻¹)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	0,9 ^{ns} 1,64 ^{ns} 5,26 [*]
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 1,87 ^{ns} 4,83 ^{**}
0,20	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 7,31 ^{ns} 15,12 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 5,48 ^{ns} 35,64 ^{**}
0,30	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	0,90 ^{ns} 1,81 ^{ns} 18,19 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	0,90 ^{ns} 7,21 ^{ns} 54,53 ^{**}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 12 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado radial traseiro com 168 kPa de pressão de insuflagem

Curvas comparadas		Valor de F
Rodado traseiro a 0,30 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 0,13 ^{ns} 3,75 ^{ns}
Rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,10 m.m ⁻¹	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 0,15 ^{ns} 4,97 [*]

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 13 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados radiais com 168 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^C
0,10	Após rodado dianteiro	1,46 ^B
	Após rodado traseiro	1,48 ^B
0,20	Após rodado dianteiro	1,50 ^B
	Após rodado traseiro	1,52 ^A
0,30	Após rodado dianteiro	1,54 ^A
	Após rodado traseiro	1,56 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 13, evidencia-se o efeito do tráfego do trator Massey Ferguson 5290 acoplado com rodados radiais, com pressão de insuflagem de 98 kPa, para os níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Observa-se, nessa figura, que todas as condições de tráfego tiveram efeito em deslocar as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.

No Quadro 14, mostra-se a comparação entre as curvas de compressão secundárias, após a linearização, para os níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Em todas as condições de patinagem impostas ao rodado, o comportamento das curvas apresentou diferença significativa, exceto para a patinagem de 0,10 m.m⁻¹. O tráfego do rodado dianteiro não alterou, de forma significativa, os valores de inclinação, não ocorrendo o mesmo para o rodado traseiro. Com relação ao intercepto, notou-se que, a 0,10 m.m⁻¹ de patinagem, o rodado dianteiro não exibiu diferença significativa. Já as demais condições mostraram-se diferentes.

As patinagens de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹ não apresentaram diferença significativa entre equações das curvas de compressão secundárias. As patinagens de 0,30 e 0,20 foram diferentes, estatisticamente, ao se comparar o intercepto (Quadro 15).

No Quadro 16, apresentam-se os valores de densidade do solo obtidos após o tráfego. Observa-se, nesse quadro, que para 0,10 m.m⁻¹ de patinagem não ocorreu diferença significativa ao comparar as condições antes e depois do

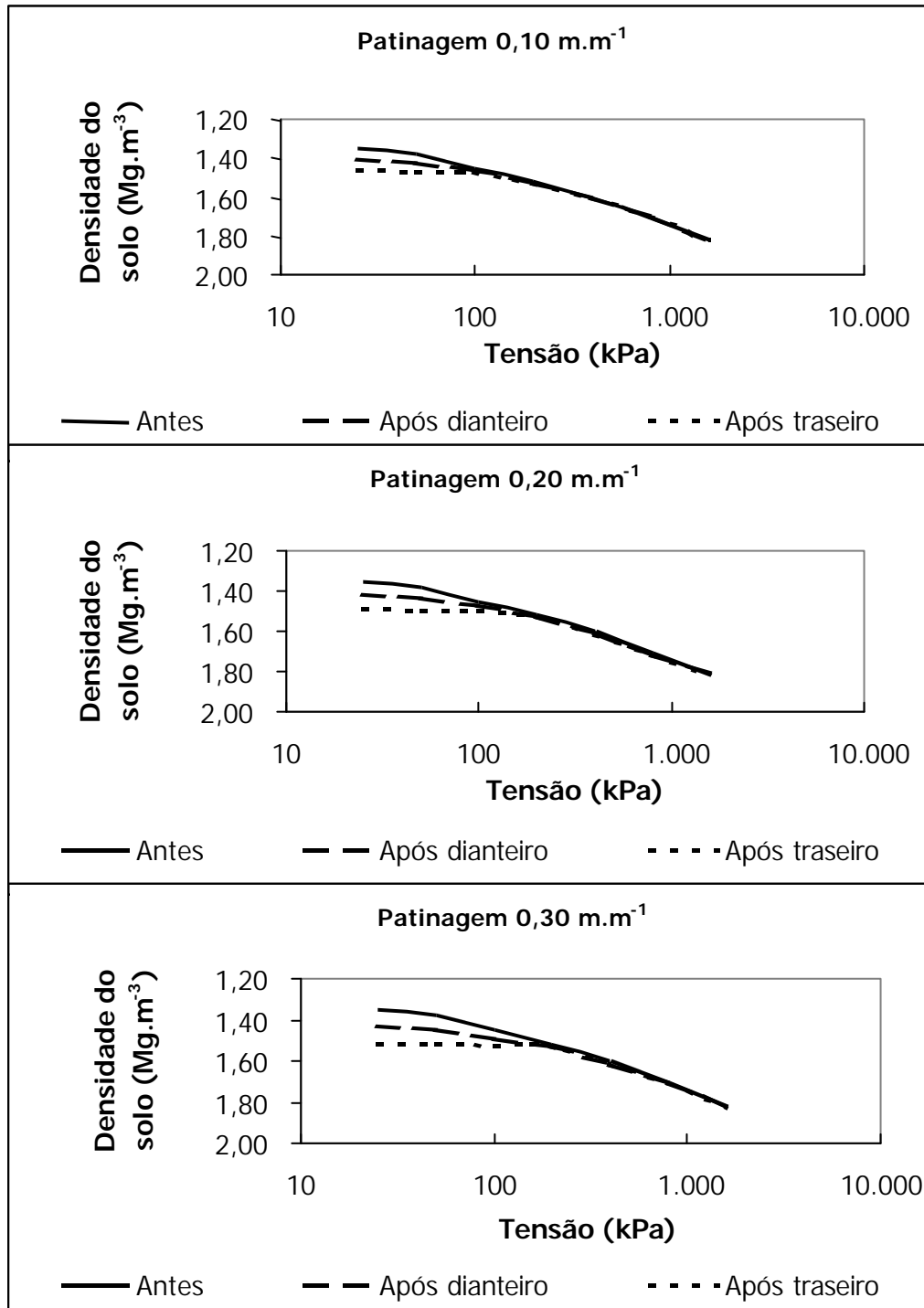


Figura 13 – Curvas de compressão das amostras de solo com teor de água de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$ e trator acoplado com rodados radiais com 98 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

Quadro 14 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego dos rodados radiais com 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m^{-1})	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	1,46 ^{ns}
		Intercepto	2,66 ^{ns}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
	Inclinação	4,66 [*]	
	Intercepto	7,67 ^{**}	
0,20	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	1,81 ^{ns}
		Intercepto	4,69 [*]
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
	Inclinação	7,56 [*]	
	Intercepto	13,94 ^{**}	
0,30	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	2,89 ^{ns}
		Intercepto	6,87 [*]
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	0,90 ^{ns}
	Inclinação	11,12 [*]	
	Intercepto	19,00 ^{**}	

** Significativo ($P < 0,01$), * Significativo ($P < 0,05$) e ns Não-significativo ($P > 0,05$), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 15 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado radial traseiro com 98 kPa de pressão de insuflagem

Curvas comparadas		Valor de F
Rodado traseiro a $0,30 \text{ m.m}^{-1}$ x rodado traseiro a $0,20 \text{ m.m}^{-1}$	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,24 ^{ns}
	Intercepto	5,08 [*]
Rodado traseiro a $0,20 \text{ m.m}^{-1}$ x rodado traseiro a $0,10 \text{ m.m}^{-1}$	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,28 ^{ns}
	Intercepto	1,46 ^{ns}

** Significativo ($P < 0,01$), * Significativo ($P < 0,05$) e ns Não-significativo ($P > 0,05$), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 16 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados radiais com 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m^{-1})	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m^{-3})
Antes		1,32 ^C
0,10	Após rodado dianteiro	1,43 ^C
	Após rodado traseiro	1,45 ^B
0,20	Após rodado dianteiro	1,46 ^B
	Após rodado traseiro	1,48 ^A
0,30	Após rodado dianteiro	1,49 ^A
	Após rodado traseiro	1,51 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

tráfego do rodado dianteiro, com a ressalva de que as demais condições de tráfego alteraram, de forma significativa, a densidade do solo. Os rodados dianteiro e traseiro não diferiram estatisticamente; nas patinagens de 0,10 e 0,20 m.m^{-1} , ocorreu diferença significativa entre os rodados, para a condição de 0,30 m.m^{-1} de patinagem.

No Quadro 17, mostra-se a comparação entre as equações de regressão dos rodados radiais com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem, para as condições de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} . Observa-se, nesse quadro, que a 0,10 m.m^{-1} de patinagem não ocorreu diferença significativa entre os rodados. Para as demais condições de patinagem, as equações diferiram estatisticamente, apresentando inclinações iguais e interceptos diferentes.

Para as condições de 0,20 e 0,30 m.m^{-1} de patinagem, notou-se que o rodado com 168 kPa de pressão de insuflagem diferiu significativamente do rodado com 98 kPa, ao se compararem os valores de densidade do solo. A 0,10 m.m^{-1} de patinagem não ocorreu diferença significativa, ao se compararem as pressões (Quadro 18).

Quadro 17 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado radial traseiro com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	168 x 98	Equação	0,90 ^{ns}
		Inclinação	0,22 ^{ns}
		Intercepto	1,82 ^{ns}
0,20	168 x 98	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,18 ^{ns}
		Intercepto	5,54 [*]
0,30	168 x 98	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,30 ^{ns}
		Intercepto	10,07 ^{**}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 18 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados radiais com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^C
0,10	Radial traseiro 98 kPa	1,45 ^B
	Radial traseiro 168 kPa	1,48 ^B
0,20	Radial traseiro 98 kPa	1,48 ^B
	Radial traseiro 168 kPa	1,52 ^A
0,30	Radial traseiro 98 kPa	1,51 ^B
	Radial traseiro 168 kPa	1,56 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.2.2. Teor de água no solo de 0,05 kg.kg⁻¹

Na Figura 14, apresentam-se as curvas de compressão das amostras de solo submetido ao tráfego de um trator agrícola acoplado com rodados diagonais inflados a 168 kPa e em níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Observa-se, nesse quadro, que o tráfego deslocou as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.

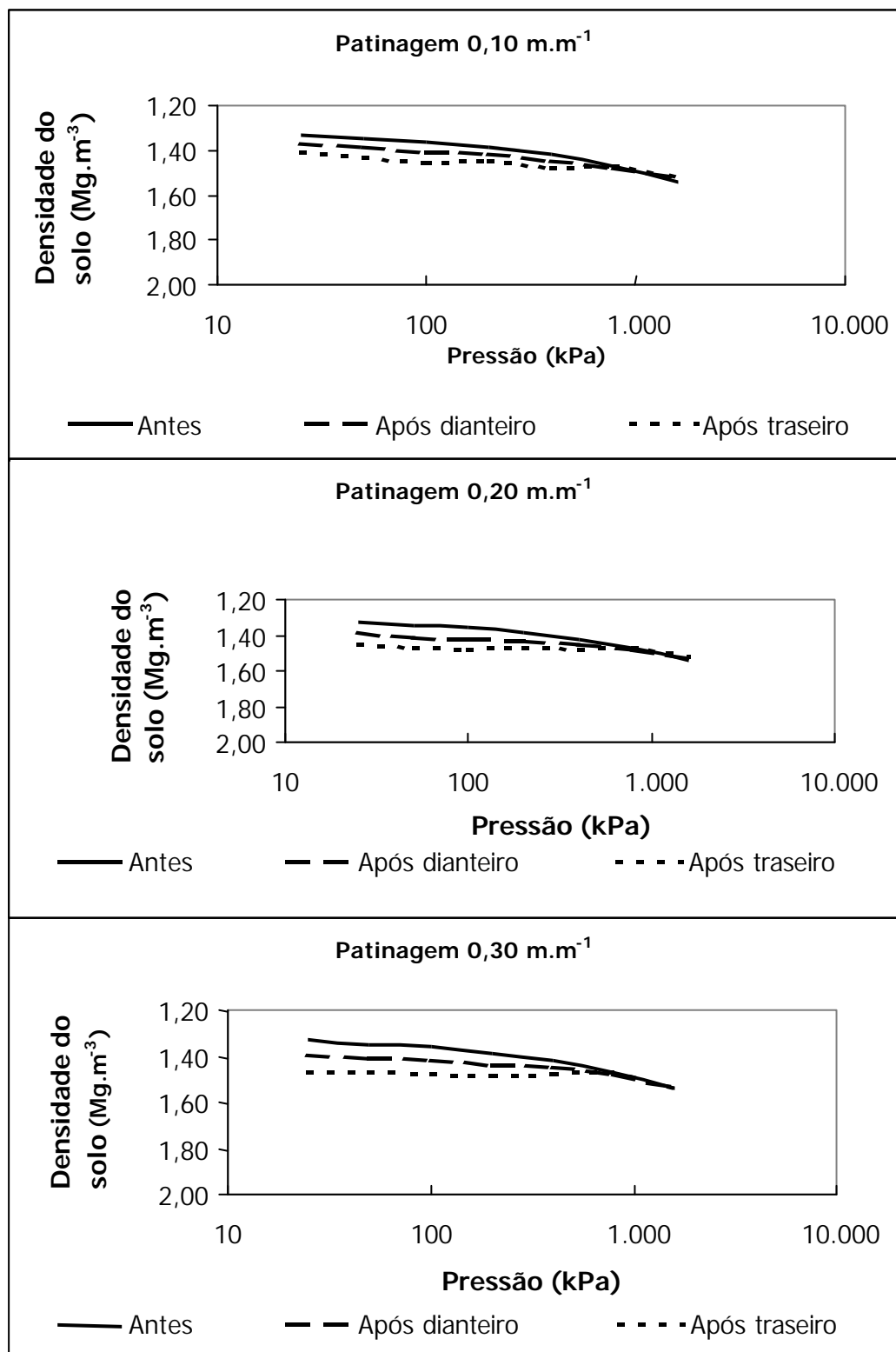


Figura 14 – Curvas de compressão das amostras de solo com teor de água de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$ e trator acoplado com rodados diagonais com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

No Quadro 19, mostra-se a comparação entre as equações de regressão referentes às curvas de compressão secundárias do solo, após a linearização, para o teor de água no solo de 0,05 kg.kg⁻¹ e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. As equações de regressão foram diferentes estatisticamente entre si. Não ocorreu alteração na inclinação das equações de regressão para todas as condições de tráfego, ou seja, a capacidade de recuperação das deformações que ocorrem na zona elástica não foi alterada. O intercepto com as ordenadas evidenciou alterações estatisticamente significativas em todas as condições de tráfego.

Quadro 19 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,01 ^{ns}
		Intercepto	5,00 [*]
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
Inclinação	0,01 ^{ns}		
Intercepto	4,90 [*]		
0,20	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,13 ^{ns}
		Intercepto	9,39 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
Inclinação	0,13 ^{ns}		
Intercepto	9,29 ^{**}		
0,30	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,13 ^{ns}
		Intercepto	11,18 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
Inclinação	0,13 ^{ns}		
Intercepto	11,21 ^{**}		

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

As patinagens de 0,30 e 0,20 m.m⁻¹ não diferiram entre si, estatisticamente, pelo procedimento de SNEDECOR e COCHARAN (1989), ocorrendo diferença significativa das equações para os valores de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹ (Quadro 20).

Quadro 20 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado diagonal traseiro com 168 kPa de pressão de insuflagem

Curvas comparadas		Valor de F
Rodado traseiro a 0,30 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,24 ^{ns}
	Intercepto	3,08 ^{ns}
Rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,10 m.m ⁻¹	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,28 ^{ns}
	Intercepto	5,30 [*]

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

A 0,10 m.m⁻¹ de patinagem, o rodado dianteiro não exibiu diferença significativa na densidade do solo (Quadro 21), ao se compararem as condições antes e depois do tráfego. Nas demais condições, observou-se alteração significativa na densidade do solo e, para cada condição de patinagem, diferença no tráfego de rodados dianteiro e traseiro.

Quadro 21 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados diagonais com 168 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^C
0,10	Após rodado dianteiro	1,35 ^C
	Após rodado traseiro	1,38 ^B
0,20	Após rodado dianteiro	1,37 ^B
	Após rodado traseiro	1,42 ^A
0,30	Após rodado dianteiro	1,38 ^B
	Após rodado traseiro	1,44 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 15, mostram-se as curvas de compressão das amostras de solo submetido ao tráfego de um trator agrícola acoplado com rodados diagonais inflados a 98 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Observou-se que o tráfego não deslocou as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.

No Quadro 22, apresenta-se a comparação das equações de regressão da curva de compressão secundária, após a linearização, obtidas do rodado diagonal a 98 kPa de pressão de insuflagem, para os níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Observa-se nesse quadro que, para essa condição, as equações foram todas iguais.

Não se verificou diferença significativa entre equações das curvas de compressão secundárias ao comparar o efeito da patinagem (Quadro 23). Tampouco, a densidade do solo apresentou diferença significativa para as condições antes e depois do tráfego (Quadro 24).

No Quadro 25, mostra-se a comparação das equações de regressão das curvas de compressão secundárias, para as condições de pressão de insuflagem impostas. Observa-se, nesse quadro, que há diferença significativa entre equações, para qualquer condição de patinagem.

No Quadro 26, verifica-se que os rodados inflados a 98 kPa não causaram alteração significativa na densidade do solo, para todas as condições de patinagem. Os rodados inflados a 168 kPa diferiram da condição antes do tráfego e não entre si, ao se compararem as patinagens.

Na Figura 16, mostram-se as curvas de compressão das amostras de solo submetido ao tráfego de um trator agrícola acoplado com rodados radiais inflados a 168 kPa e em níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Observa-se, nessa figura, que o tráfego deslocou as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.

No Quadro 27, apresenta-se a comparação das equações de regressão da curva de compressão secundária, após a linearização, obtidas para o rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem, nos níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. As equações foram estatisticamente diferentes, com a ressalva de que o intercepto mostrou diferença significativa. No Quadro 28, mostra-se a comparação entre as equações de regressão das patinagens impostas ao rodado. Observa-se, nesse quadro, que os valores de 0,30 e 0,20 m.m⁻¹ não diferiram entre si, estatisticamente; já os valores de 0,20 e 0,10 tiveram diferença significativa apenas no intercepto.

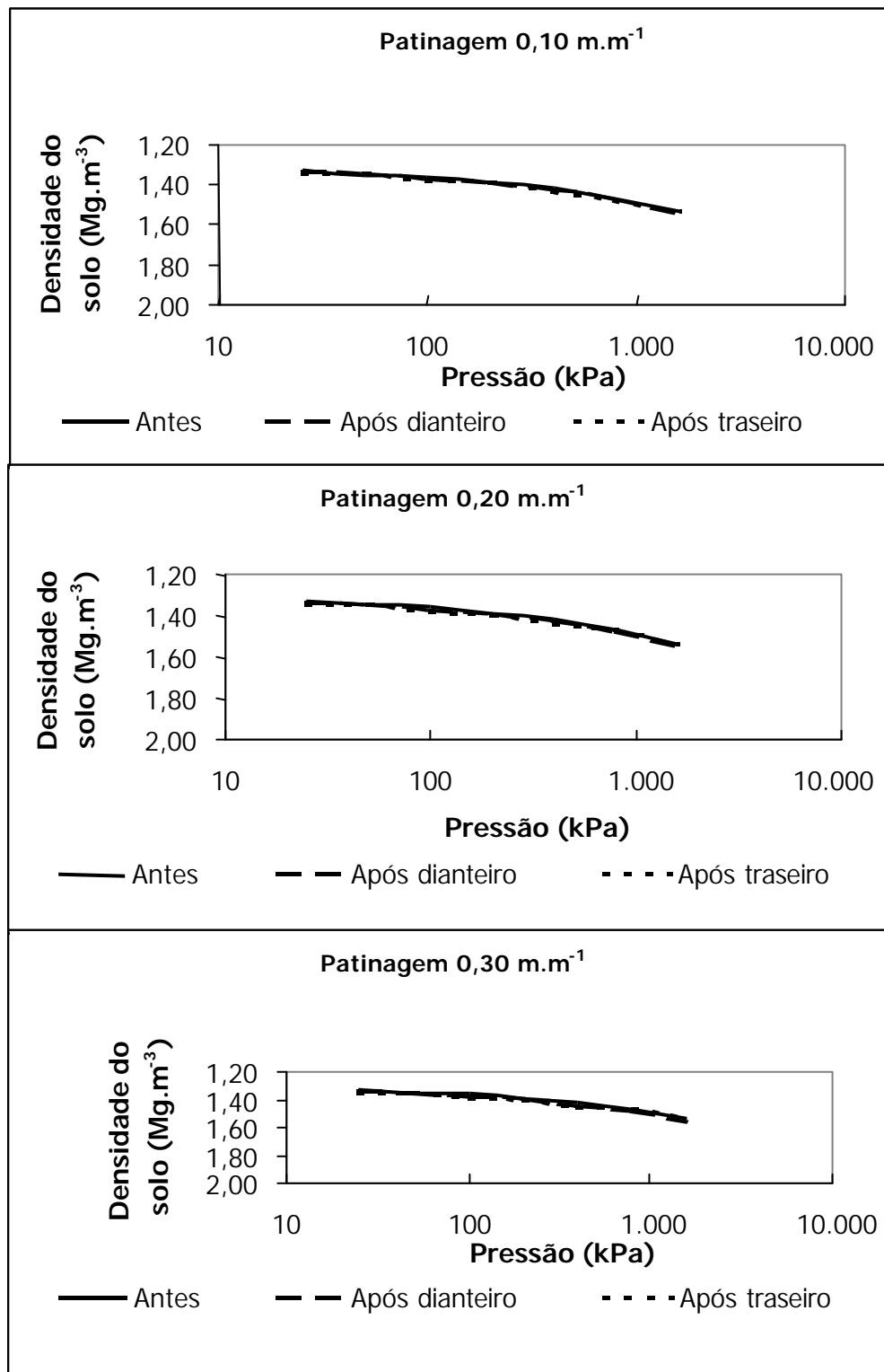


Figura 15 – Curvas de compressão das amostras de solo com teor de água de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$ e trator acoplado com rodados diagonais com 98 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

Quadro 22 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego dos rodados diagonais com 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m⁻¹)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 0,01 ^{ns} 0,02 ^{ns}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 0,01 ^{ns} 0,02 ^{ns}
0,20	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 0,01 ^{ns} 0,10 ^{ns}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 0,01 ^{ns} 0,10 ^{ns}
0,30	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 0,01 ^{ns} 0,24 ^{ns}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação Inclinação Intercepto	1,00 ^{ns} 0,02 ^{ns} 0,30 ^{ns}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 23 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado diagonal traseiro com 98 kPa de pressão de insuflagem

Curvas comparadas		Valor de F
Rodado traseiro a 0,30 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 0,34 ^{ns} 3,18 ^{ns}
Rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,10 m.m ⁻¹	Equação Inclinação Intercepto	1,0 ^{ns} 0,28 ^{ns} 4,30 ^{ns}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 24 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados diagonais com 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^A
0,10	Após rodado dianteiro	1,33 ^A
	Após rodado traseiro	1,34 ^A
0,20	Após rodado dianteiro	1,34 ^A
	Após rodado traseiro	1,35 ^A
0,30	Após rodado dianteiro	1,34 ^A
	Após rodado traseiro	1,36 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quadro 25 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado diagonal traseiro com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	168 x 98	Equação	0,90 ^{ns}
		Inclinação	0,02 ^{ns}
		Intercepto	4,50 [*]
0,20	168 x 98	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,08 ^{ns}
		Intercepto	9,24 ^{**}
0,30	168 x 98	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,03 ^{ns}
		Intercepto	10,07 ^{**}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 26 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados diagonais com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^B
0,10	Diagonal traseiro 98 kPa	1,34 ^B
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,38 ^A
0,20	Diagonal traseiro 98 kPa	1,35 ^B
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,42 ^A
0,30	Diagonal traseiro 98 kPa	1,36 ^B
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,44 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

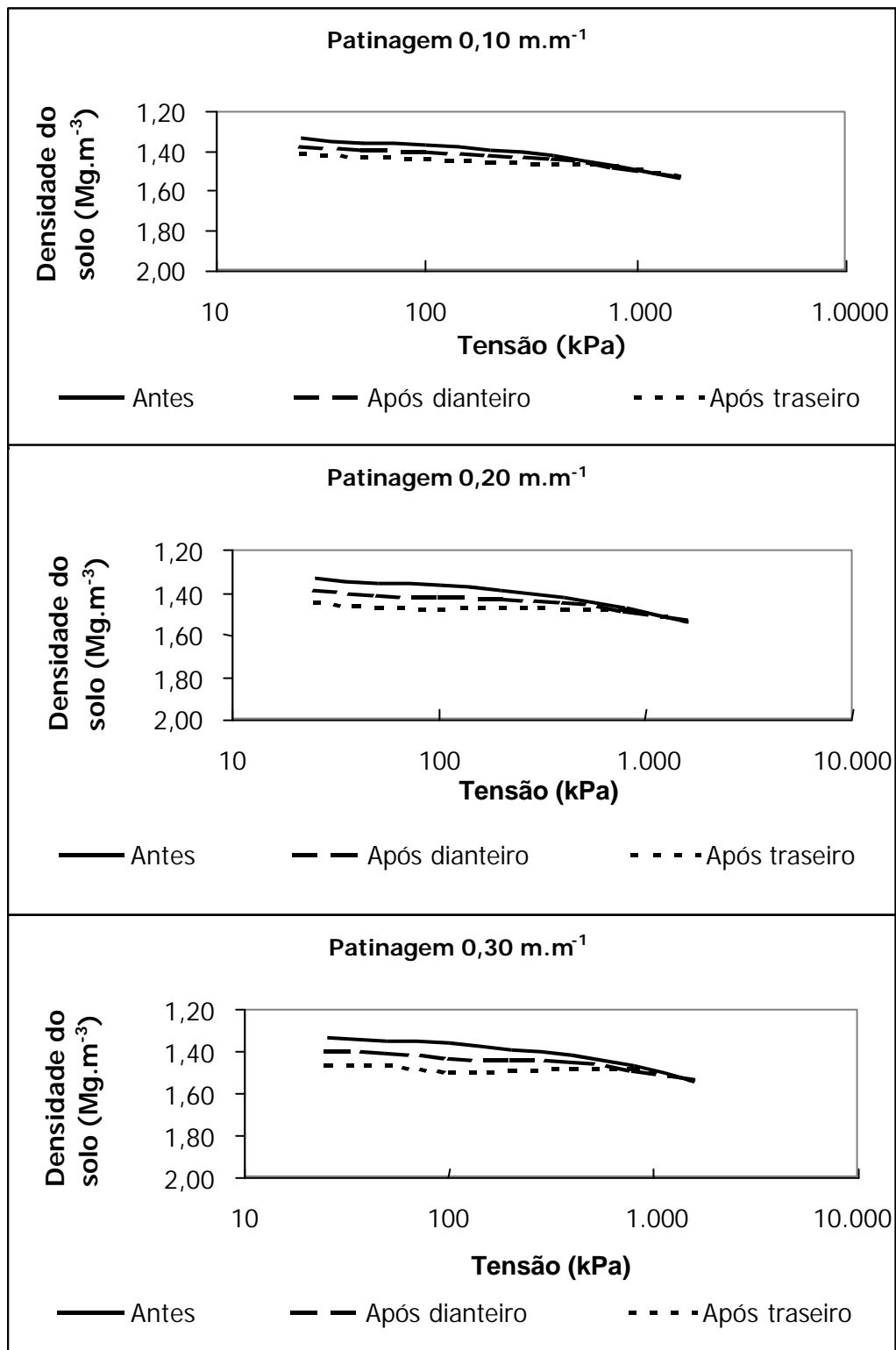


Figura 16 – Curvas de compressão das amostras de solo com teor de água de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$ e trator acoplado com rodados radiais com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

Quadro 27 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego dos rodados radiais com 168 kPa de pressão de insuflagem

Patinação ($m.m^{-1}$)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,01 ^{ns}
		Intercepto	5,00 [*]
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
	Inclinação	0,01 ^{ns}	
	Intercepto	4,39 [*]	
0,20	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,13 ^{ns}
		Intercepto	5,86 [*]
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
	Inclinação	0,13 ^{ns}	
	Intercepto	7,96 ^{**}	
0,30	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,13 ^{ns}
		Intercepto	9,15 ^{**}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
	Inclinação	0,13 ^{ns}	
	Intercepto	11,02 ^{**}	

** Significativo ($P < 0,01$), * Significativo ($P < 0,05$) e ns Não-significativo ($P > 0,05$), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 28 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado radial traseiro com 168 kPa de pressão de insuflagem

Curvas comparadas		Valor de F
Rodado traseiro a 0,30 $m.m^{-1}$ x rodado traseiro a 0,20 $m.m^{-1}$	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,24 ^{ns}
	Intercepto	4,08 ^{ns}
Rodado traseiro a 0,20 $m.m^{-1}$ x rodado traseiro a 0,10 $m.m^{-1}$	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,28 ^{ns}
	Intercepto	6,03 [*]

** Significativo ($P < 0,01$), * Significativo ($P < 0,05$) e ns Não-significativo ($P > 0,05$), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

O tráfego do rodado dianteiro a $0,10 \text{ m.m}^{-1}$ de patinagem não causou alteração significativa na densidade do solo, em que as demais condições de tráfego causaram alteração significativa. Em cada condição de patinagem, observou-se que ocorria diferença entre tráfegos de rodados dianteiro e traseiro (Quadro 29).

Quadro 29 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados radiais com 168 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m^{-1})	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m^{-3})
Antes		1,32 ^C
0,10	Após rodado dianteiro	1,35 ^C
	Após rodado traseiro	1,38 ^B
0,20	Após rodado dianteiro	1,37 ^B
	Após rodado traseiro	1,42 ^A
0,30	Após rodado dianteiro	1,38 ^B
	Após rodado traseiro	1,44 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 17, mostram-se as curvas de compressão das amostras de solo submetido ao tráfego de um trator agrícola acoplado com rodados radiais inflados a 98 kPa e em níveis de patinagem de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$. Observa-se, nessa figura, que o tráfego não deslocou as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.

No Quadro 30, apresenta-se a comparação das equações de regressão para a condição de rodados radiais a 98 kPa de pressão de insuflagem, para os níveis de patinagem de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$. Observa-se, nesse quadro, que as equações, para as condições operacionais impostas, não foram estatisticamente diferentes.

Ao comparar o efeito da patinagem, não se observou diferença estatisticamente significativa entre equações das curvas de compressão secundárias (Quadro 31). Tampouco a densidade do solo apresentou diferença significativa para as condições de tráfego de rodados dianteiro ou traseiro e de patinagem (Quadro 32).

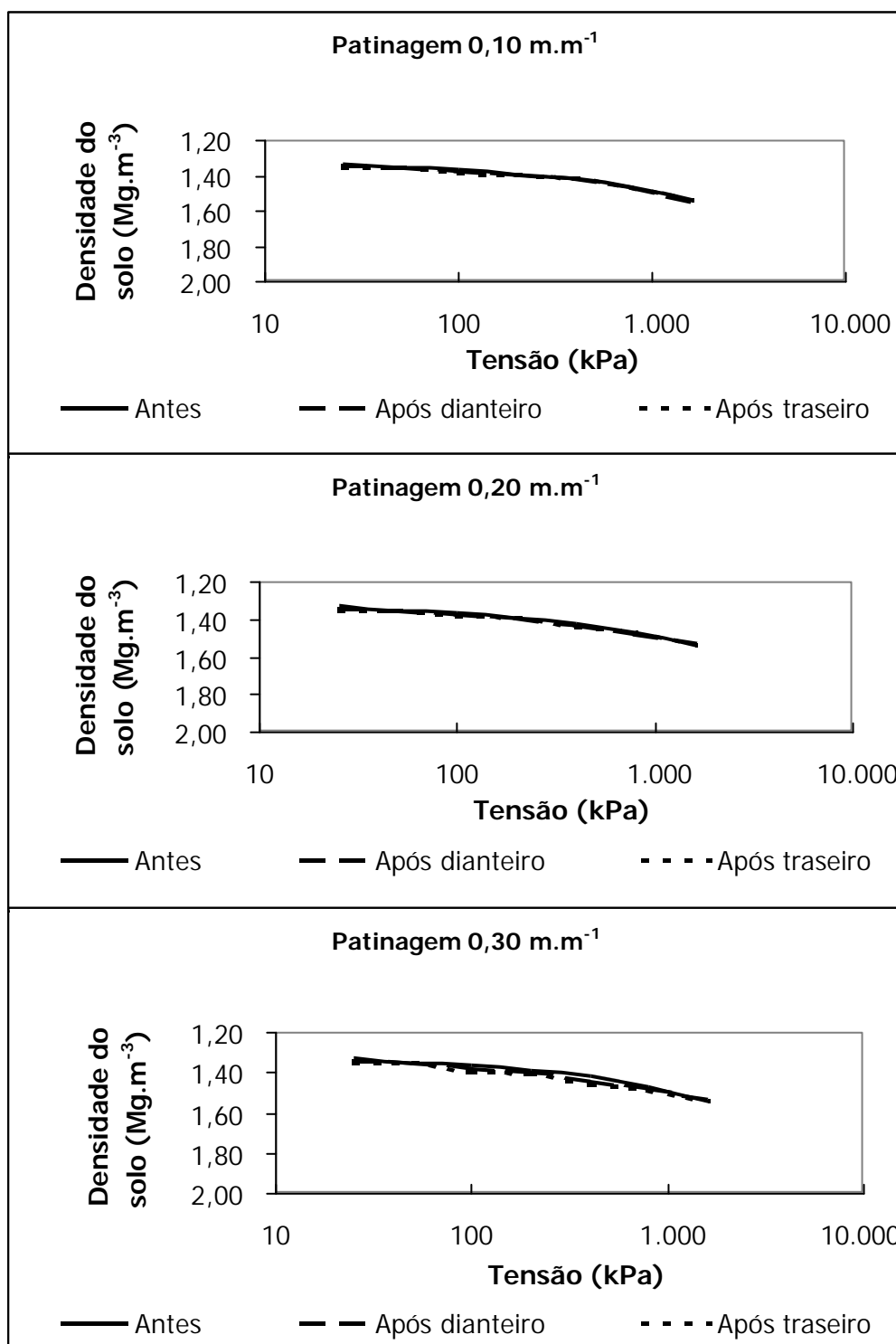


Figura 17 – Curvas de compressão das amostras de solo com teor de água de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$ e trator acoplado com rodados radiais com 98 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

Quadro 30 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego dos rodados radiais com 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m⁻¹)	Curvas comparadas		Valor de F
0,10	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,01 ^{ns}
		Intercepto	0,02 ^{ns}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
	Inclinação	0,01 ^{ns}	
	Intercepto	0,03 ^{ns}	
0,20	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,01 ^{ns}
		Intercepto	0,10 ^{ns}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
	Inclinação	0,01 ^{ns}	
	Intercepto	0,09 ^{ns}	
0,30	Antes do tráfego x após rodado dianteiro	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,01 ^{ns}
		Intercepto	0,20 ^{ns}
	Após rodado dianteiro x após rodado traseiro	Equação	1,00 ^{ns}
	Inclinação	0,01 ^{ns}	
	Intercepto	0,29 ^{ns}	

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 31 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado radial traseiro com 98 kPa de pressão de insuflagem

Curvas comparadas		Valor de F
Rodado traseiro a 0,30 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,24 ^{ns}
	Intercepto	3,98 ^{ns}
Rodado traseiro a 0,20 m.m ⁻¹ x rodado traseiro a 0,10 m.m ⁻¹	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	0,98 ^{ns}
	Intercepto	4,03 ^{ns}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 32 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados radiais com 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^A
0,10	Após rodado dianteiro	1,33 ^A
	Após rodado traseiro	1,34 ^A
0,20	Após rodado dianteiro	1,34 ^A
	Após rodado traseiro	1,36 ^A
0,30	Após rodado dianteiro	1,34 ^A
	Após rodado traseiro	1,36 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Comparando as condições de 168 *versus* 98 kPa de pressão de insuflagem (Quadro 33), notou-se que, a 0,10 m.m⁻¹ de patinagem, as equações não foram estatisticamente diferentes. Para as condições de 0,20 e 0,30 m.m⁻¹ de patinagem, verificou-se diferença significativa nos interceptos.

Quadro 33 – Comparação das curvas de compressão secundárias, após a linearização, obtidas após o tráfego do rodado radial traseiro com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Curvas comparadas	Valor de F	
0,10	168 x 98	Equação	0,90 ^{ns}
		Inclinação	0,02 ^{ns}
		Intercepto	5,36 ^{ns}
0,20	168 x 98	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,08 ^{ns}
		Intercepto	10,42 ^{**}
0,30	168 x 98	Equação	1,00 ^{ns}
		Inclinação	0,03 ^{ns}
		Intercepto	11,70 ^{**}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Os rodados inflados a 98 kPa não alteraram, de forma significativa, a densidade do solo, em todas as condições de patinagem (Quadro 34). Os rodados inflados a 168 kPa não alteraram significativamente a densidade do solo quando trafegando a 0,10 m.m⁻¹ de patinagem, ocorrendo alteração na densidade do solo para as demais condições de patinagem (Quadro 34).

Quadro 34 – Densidade do solo medida antes e depois do tráfego dos rodados radiais com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem

Patinagem (m.m ⁻¹)	Condição de tráfego	Densidade do solo (Mg.m ⁻³)
Antes		1,32 ^B
0,10	Diagonal traseiro 98 kPa	1,34 ^B
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,38 ^B
0,20	Diagonal traseiro 98 kPa	1,36 ^B
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,42 ^A
0,30	Diagonal traseiro 98 kPa	1,36 ^B
	Diagonal traseiro 168 kPa	1,44 ^A

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.3. Efeito do tráfego na pressão de preconsolidação

4.3.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg⁻¹

A pressão de preconsolidação representa a pressão de transição entre as fases de deformação recuperáveis e não-recuperáveis do solo, sendo utilizado por diversos profissionais da área de mecânica dos solos agrícolas como o valor-limite de pressão a ser aplicado aos solos para evitar que a compactação adicional ocorra (DIAS JUNIOR, 1994; KONDO e DIAS JUNIOR, 1999).

Os valores de pressão de preconsolidação, induzidos pelos rodados diagonais a 168 kPa de pressão de insuflagem, para as condições antes do tráfego e depois do tráfego e com patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹ de patinagem, foram diferentes, sendo os maiores valores obtidos em patinagens de 0,20 e 0,30 m.m⁻¹ (Figura 18). Nas patinagens de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹, a

pressão de preconsolidação induzida pelo rodado dianteiro difere da pressão de preconsolidação induzida pelo rodado traseiro, sendo o maior valor atribuído ao rodado traseiro. Na patinagem de 0,30 m.m⁻¹, não ocorreu diferença entre os valores de pressão de preconsolidação (Figura 18).

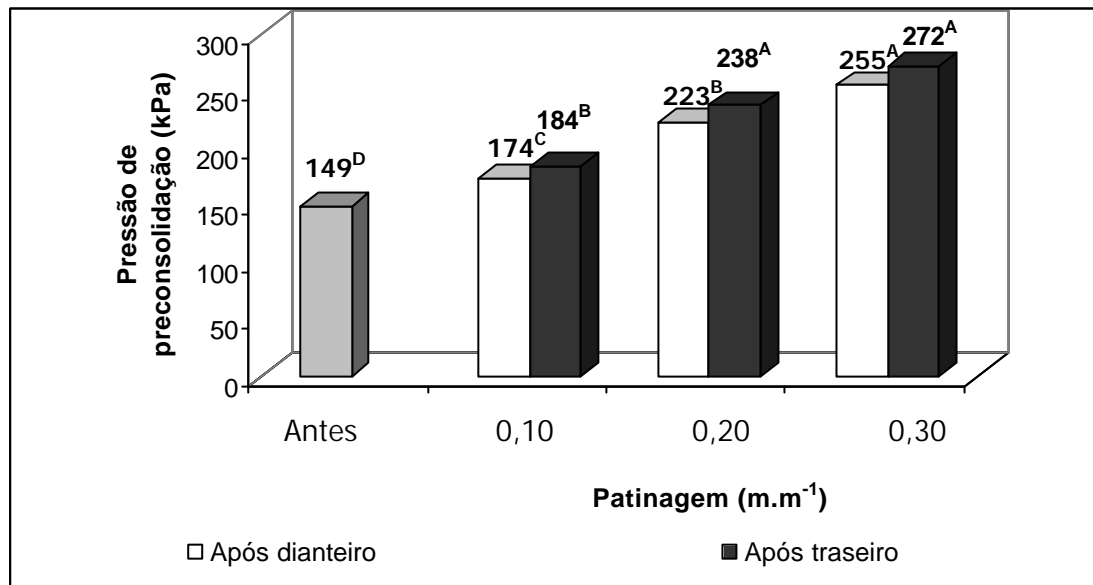


Figura 18 – Pressão de preconsolidação em função da patinagem do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na condição de rodado diagonal a 98 kPa de pressão de insuflagem, observou-se que o tráfego alterou, de forma significativa, a pressão de preconsolidação em todas as condições de patinagem, exceto na condição de rodado dianteiro a 0,10 m.m⁻¹, sendo o maior valor atribuído ao rodado traseiro a 0,30 m.m⁻¹. A pressão de preconsolidação induzida pelo rodado dianteiro diferiu da pressão de preconsolidação induzida pelo rodado traseiro, em todas as condições de patinagem (Figura 19).

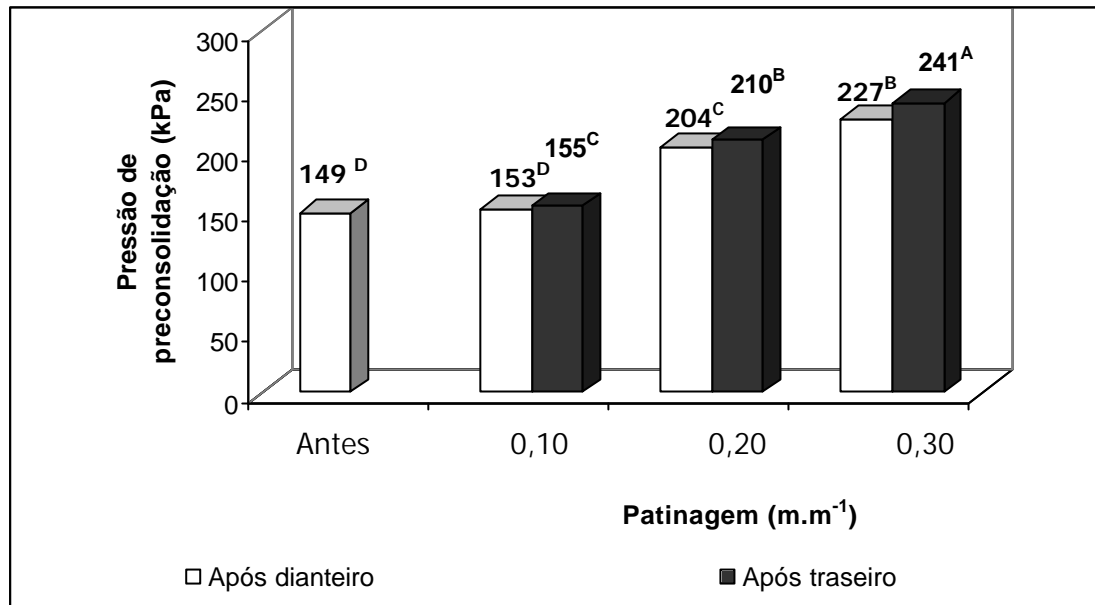


Figura 19 – Pressão de preconsolidação em função da patinação do rodado diagonal a 98 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinação de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 20, mostram-se os valores de pressão de preconsolidação obtidos nas condições de 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem, após a passagem do rodado traseiro. Nota-se, nessa figura, que o trator acoplado com rodados diagonais inflados a 168 kPa induziu maiores valores de pressão de preconsolidação, comparativamente aos rodados inflados a 98 kPa, nas condições de patinação de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹. Na condição de 0,30 m.m⁻¹ de patinação, não houve diferença estatisticamente significativa entre as pressões de preconsolidação.

Na Figura 21, mostram-se os valores de pressão de preconsolidação induzidos pelo tráfego do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, em comparação com a condição antes do tráfego. Observa-se, nessa figura, que todas as condições de tráfego diferiram estatisticamente da condição antes do tráfego, sendo o maior valor atribuído à patinação de 0,30 m.m⁻¹. Nas patinagens de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹, houve diferença entre o tráfego do rodado dianteiro e o tráfego do rodado traseiro, sendo o maior valor atribuído ao rodado traseiro.

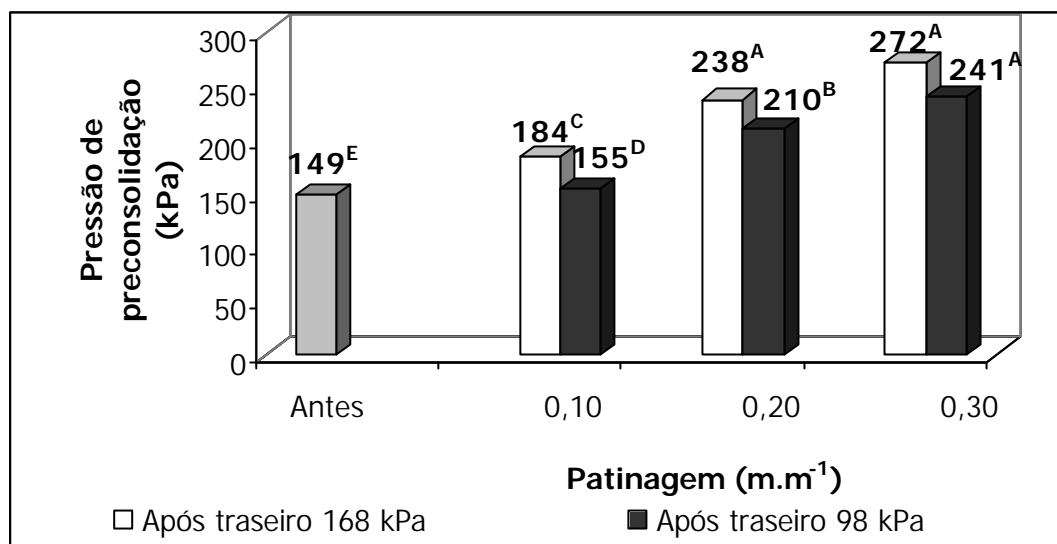


Figura 20 – Rodado diagonal com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

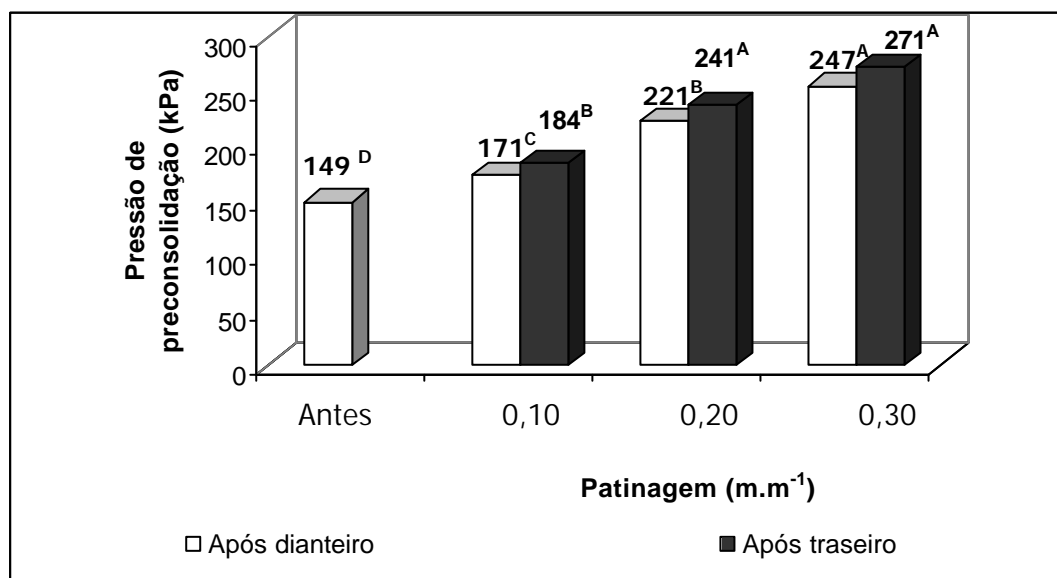


Figura 21 – Pressão de preconsolidação em função da patinagem do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na condição de rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem, não se observou diferença entre o tráfego do rodado dianteiro com $0,10 \text{ m.m}^{-1}$ de patinagem e a condição antes do tráfego, com a ressalva de que, nas demais condições de tráfego, ocorreu diferença (Figura 22). O maior valor foi atribuído à patinagem de $0,30 \text{ m.m}^{-1}$. Nas patinagens de $0,10$ e $0,20 \text{ m.m}^{-1}$, não houve diferença significativa entre rodado dianteiro e traseiro, ocorrendo diferença na patinagem de $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

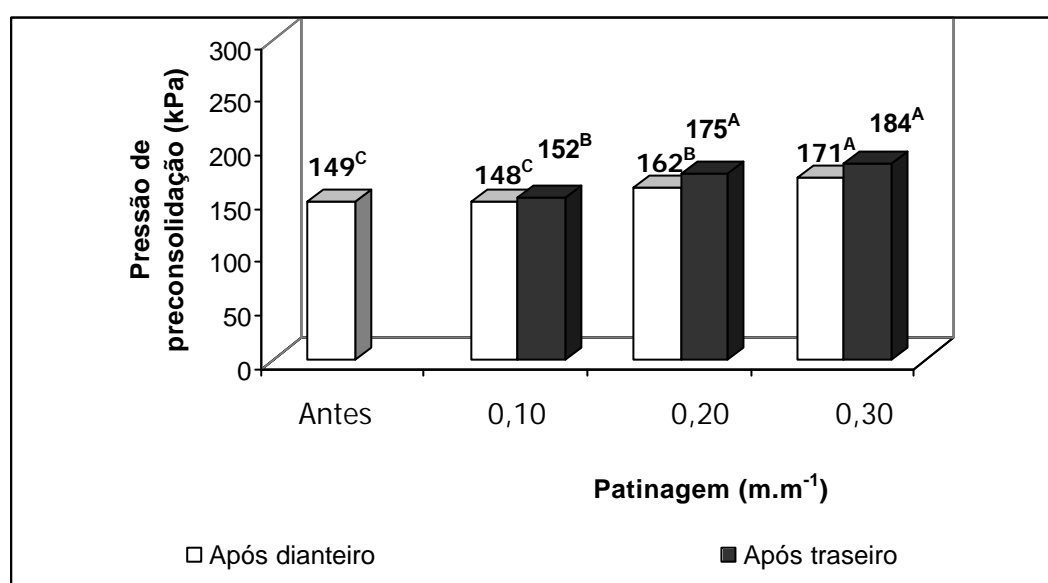


Figura 22 – Pressão de preconsolidação em função da patinagem do rodado radial a 98 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quando se compararam os valores de pressão de preconsolidação induzidos pelo rodado radial traseiro, com pressões de insuflagem de 168 e 98 kPa, notou-se que não ocorreu diferença na patinagem de $0,10 \text{ m.m}^{-1}$. Nas demais condições de tráfego, houve diferença entre pressões, sendo os maiores valores atribuídos à pressão de insuflagem de 168 kPa (Figura 23).

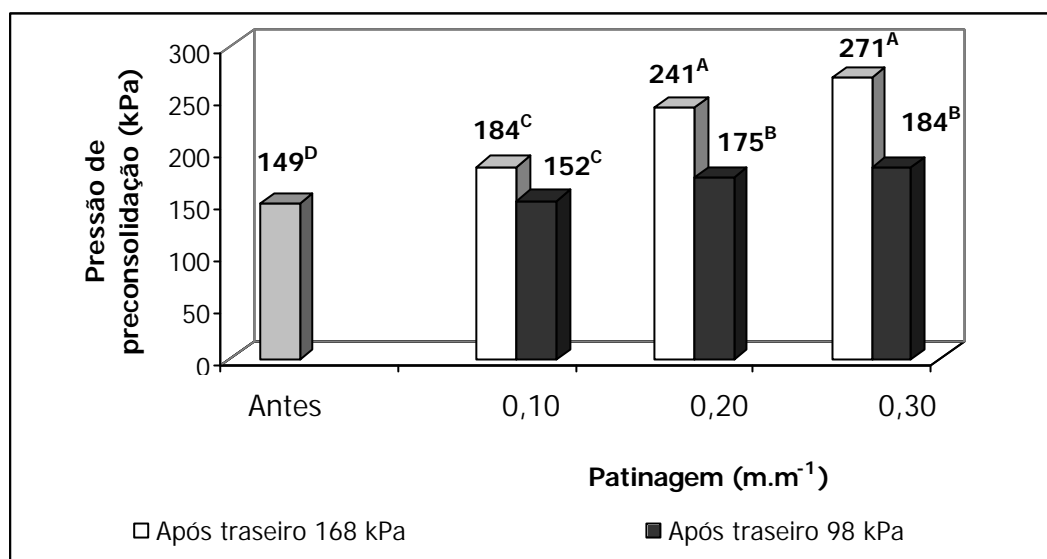


Figura 23 – Rodado radial com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nas Figuras 24 e 25, comparam-se as pressões de preconsolidação induzidas pelos rodados diagonal e radial traseiro, com pressões de insuflagem de 168 e 98 kPa, respectivamente. Nota-se nessas figuras que, na pressão de insuflagem de 168 kPa, não ocorreu diferença entre pressões de preconsolidação, quando os rodados foram comparados em cada condição de patinagem. Na pressão de insuflagem de 98 kPa e patinagem de 0,10 m.m⁻¹, não houve diferença entre pressões de preconsolidação. Nas patinagens de 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, ocorreu diferença entre pressões de preconsolidação, sendo os maiores valores atribuídos ao rodado diagonal.

4.3.2. Teor de água no solo de 0,05 kg.kg⁻¹

Na Figura 26, mostram-se os valores de pressão de preconsolidação induzidos pelo tráfego do trator agrícola acoplado com rodados diagonais a 168 kPa de pressão de insuflagem. Em todas as condições de patinagem impostas, os rodados aumentaram o valor da pressão de preconsolidação, em comparação com a condição antes do tráfego, sendo os maiores valores

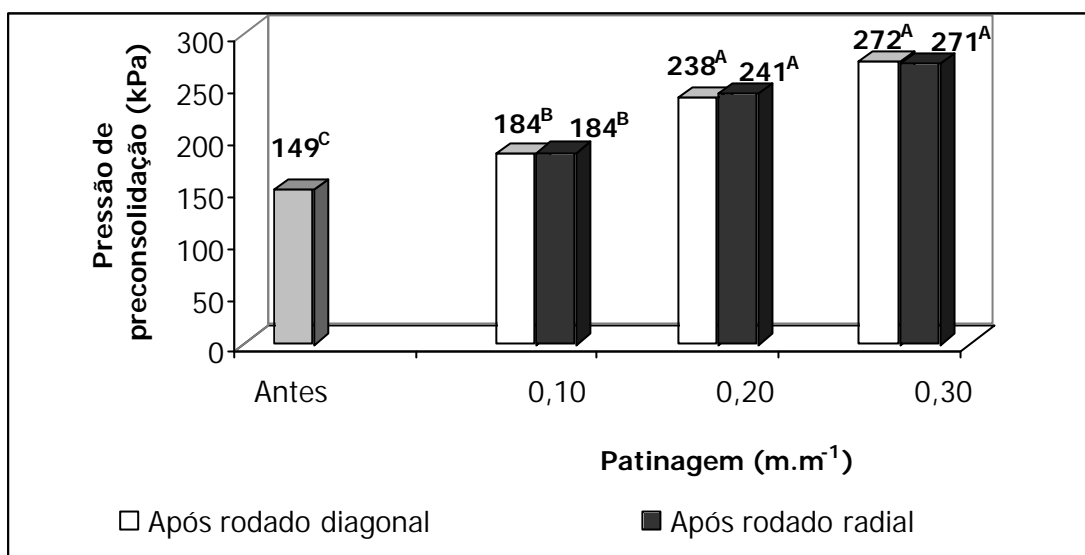


Figura 24 – Rodado diagonal traseiro *versus* radial traseiro com 168 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

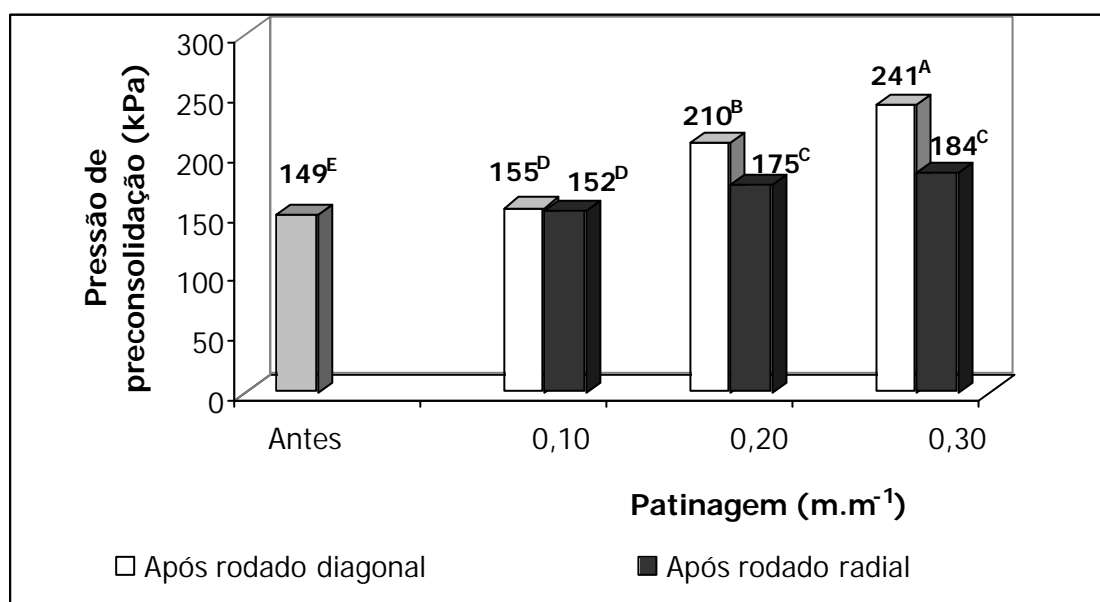


Figura 25 – Rodado diagonal traseiro *versus* radial traseiro com 98 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

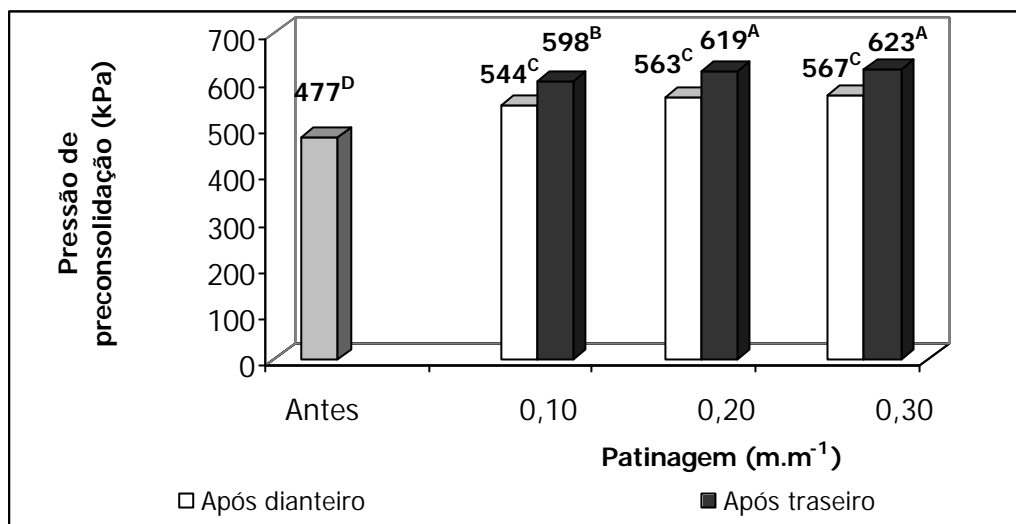


Figura 26 – Pressão de preconsolidação em função da patinagem do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

atribuídos ao tráfego do rodado traseiro com patinagens de 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. Em cada condição de patinagem, o rodado traseiro induziu maiores valores de pressão de preconsolidação, comparativamente ao rodado dianteiro.

A redução da pressão de insuflagem para 98 kPa fez com que não ocorresse diferença significativa entre as pressões de preconsolidação, nas condições antes e depois do tráfego do rodado dianteiro para qualquer condição de patinagem (Figura 27). As patinagens de 0,30 e 0,20 m.m⁻¹ alteraram, de forma significativa, os valores de pressão de preconsolidação após o tráfego do rodado traseiro.

Na Figura 28, comparam-se os valores de pressão de preconsolidação induzidos pelo tráfego dos rodados diagonais traseiros com pressões de insuflagem de 168 e 98 kPa, em cada nível de patinagem. Ao comparar a condição antes do tráfego e as demais condições de tráfego, observou-se que a pressão de preconsolidação induzida pelo rodado diagonal traseiro com 0,10 m.m⁻¹ de patinagem não diferiu da condição antes do tráfego, indicando as demais condições de tráfego diferença significativa. Em cada nível de patinagem, a pressão de preconsolidação induzida pelo rodado traseiro inflado com 168 kPa apresentou diferença significativa da pressão de preconsolidação induzida pelo rodado traseiro inflado a 98 kPa, sendo o maior valor de pressão de preconsolidação atribuído ao maior de insuflagem.

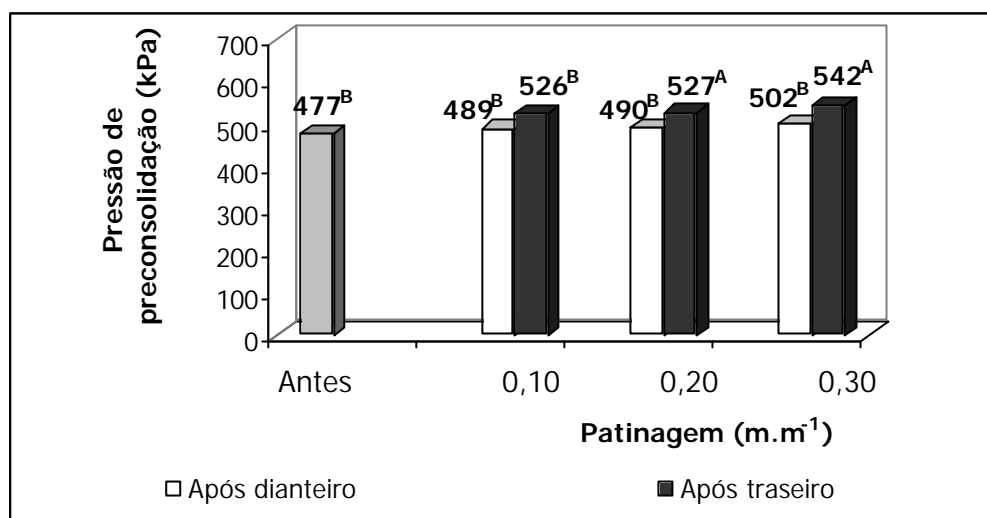


Figura 27 – Pressão de preconsolidação em função da patinagem do rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

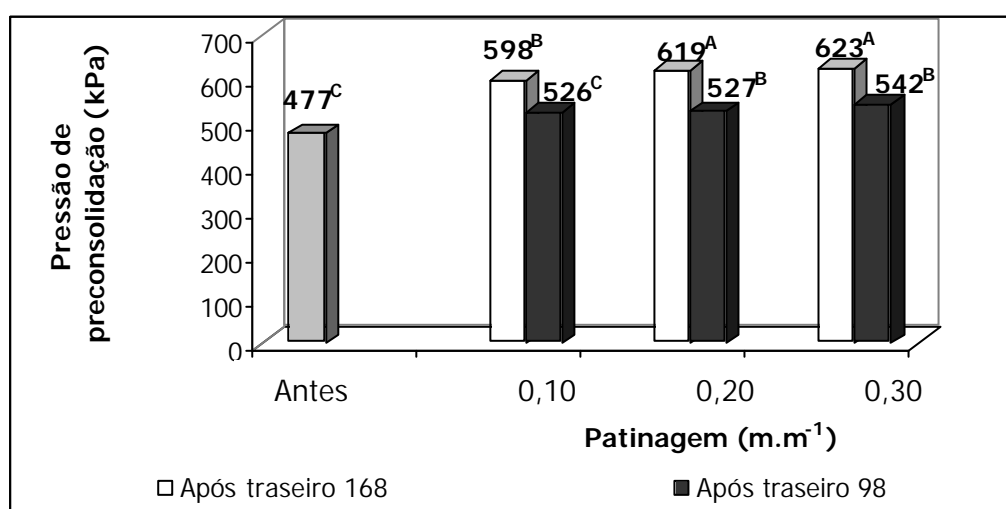


Figura 28 – Rodado diagonal traseiro com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 10, 20 e 30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem não induziu variações significativas de pressão de preconsolidação para a condição de tráfego do rodado dianteiro, alterando seu valor de forma significativa para a condição de tráfego do rodado traseiro. As pressões de preconsolidação induzidas pelo rodado traseiro com patinagens de 0,20 e 0,10 m.m⁻¹ não diferiram entre si, significativamente (Figura 29). O maior valor de pressão de preconsolidação é atribuído ao tráfego do rodado traseiro com 0,30 m.m⁻¹ de patinagem.

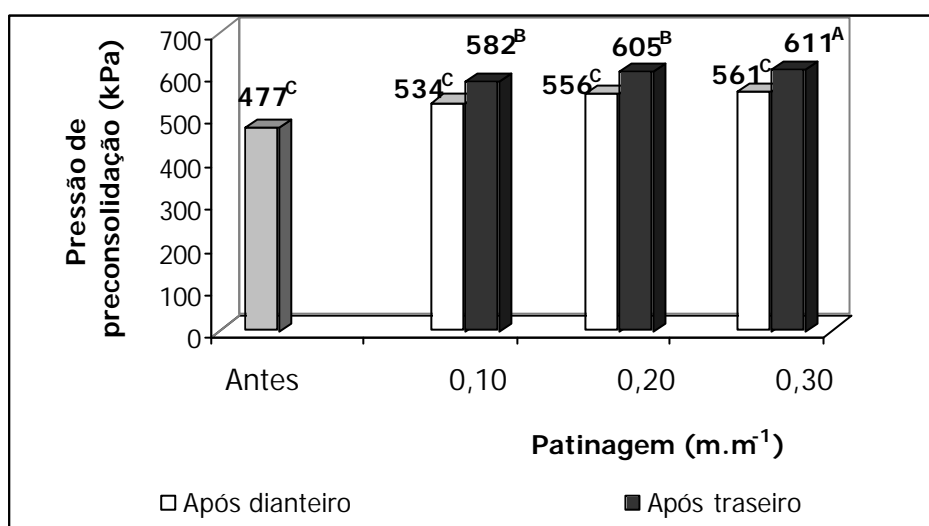


Figura 29 – Pressão de preconsolidação em função da patinagem do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Com a redução da pressão de insuflagem para 98 kPa, não ocorreu diferença significativa no tráfego do rodado dianteiro. Com relação ao rodado traseiro, os níveis de patinagem de 0,20 e 0,10 m.m⁻¹ não alteraram, de forma significativa, a pressão de preconsolidação, tendo apenas a patinagem de 0,30 m.m⁻¹ apresentado resultado significativo (Figura 30).

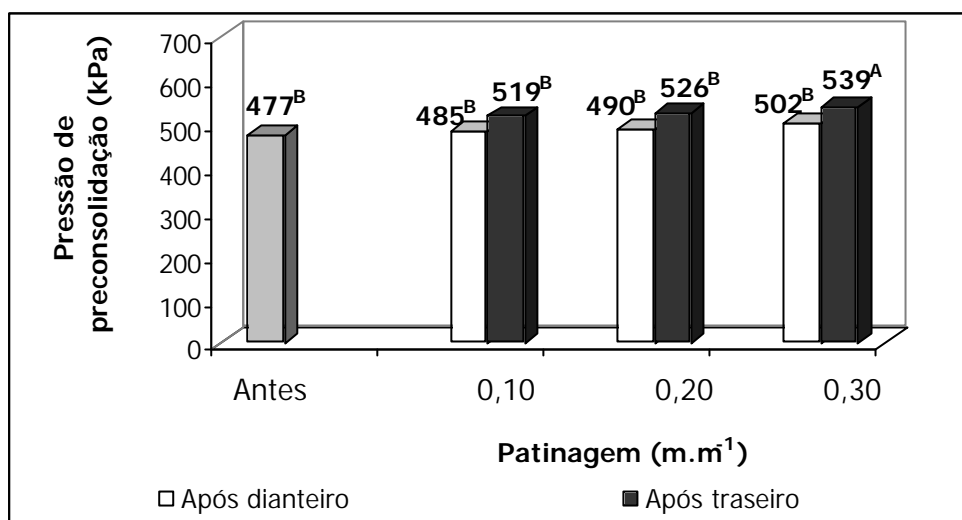


Figura 30 – Pressão de preconsolidação em função da patinagem do rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 31, mostra-se a comparação entre rodados radiais traseiros inflados a 168 e 98 kPa. Para cada condição de patinagem, a maior pressão de insuflagem induziu maior pressão de preconsolidação, em comparação com a menor pressão de insuflagem.

Na Figura 32, mostra-se que rodados diagonais com pressão de insuflagem de 168 kPa induzem maiores pressões de preconsolidação, comparativamente a rodados radiais com 168 kPa, em qualquer nível de patinagem. Ao comparar os rodados com pressão de insuflagem de 98 kPa (Figura 33), não se observou diferença significativa na pressão de preconsolidação para patinagem de 0,10 m.m⁻¹. Nos demais níveis de patinagem, o rodado diagonal induziu maiores pressões de preconsolidação (Figura 33).

Na Figura 34, mostram-se as pressões de preconsolidação induzidas pelo rodado diagonal traseiro, com pressão de insuflagem de 168 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, para as duas condições de teor de água no solo. Observa-se, nessa figura, que na condição antes e depois do tráfego do rodado traseiro em cada nível de patinagem ocorreu diferença significativa entre pressões de preconsolidação. O aumento na pressão de

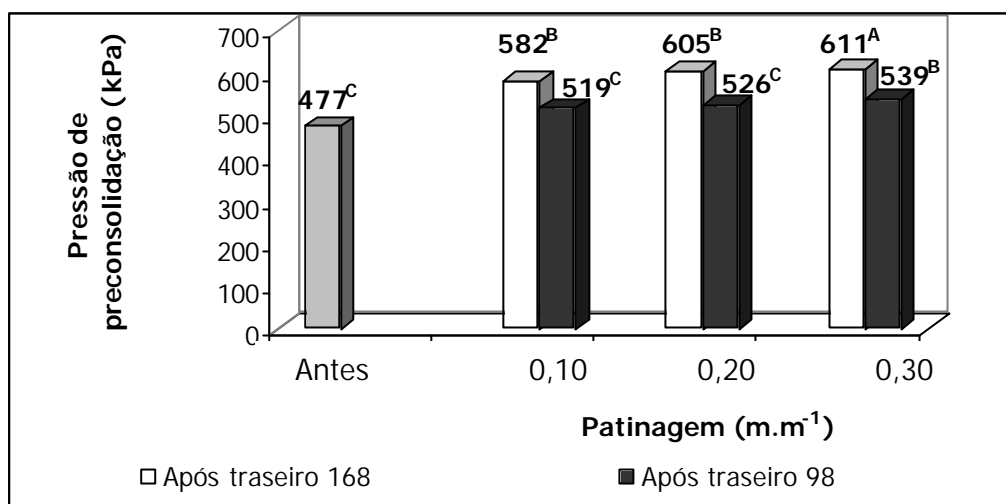


Figura 31 – Rodado radial traseiro com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem e níveis de patinagem de 10, 20 e 30 m.m⁻¹. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

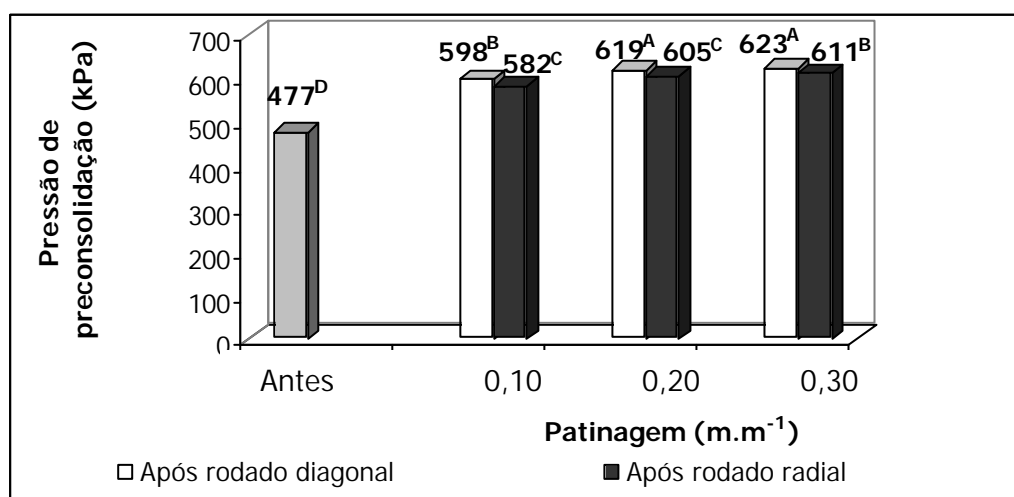


Figura 32 – Rodado diagonal traseiro *versus* radial traseiro com 168 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

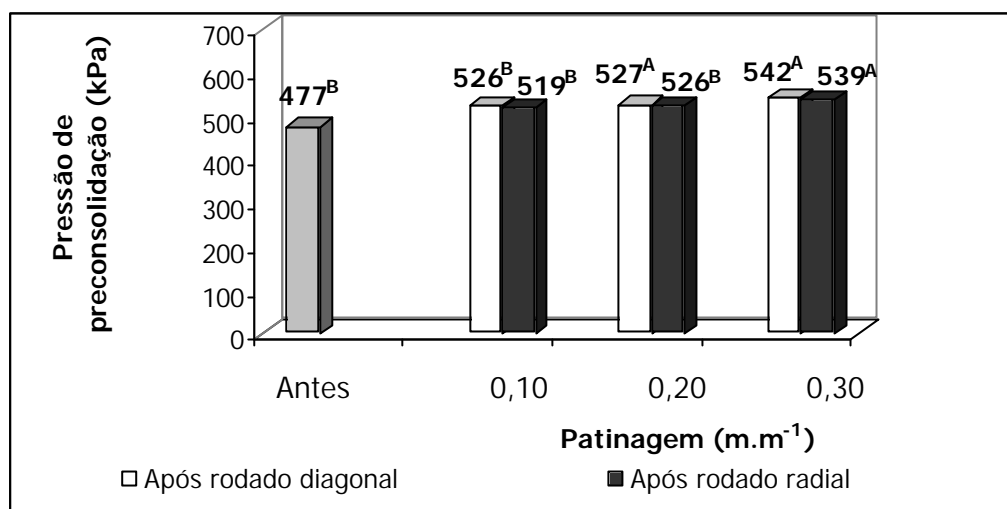


Figura 33 – Rodado diagonal traseiro *versus* radial traseiro com 98 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

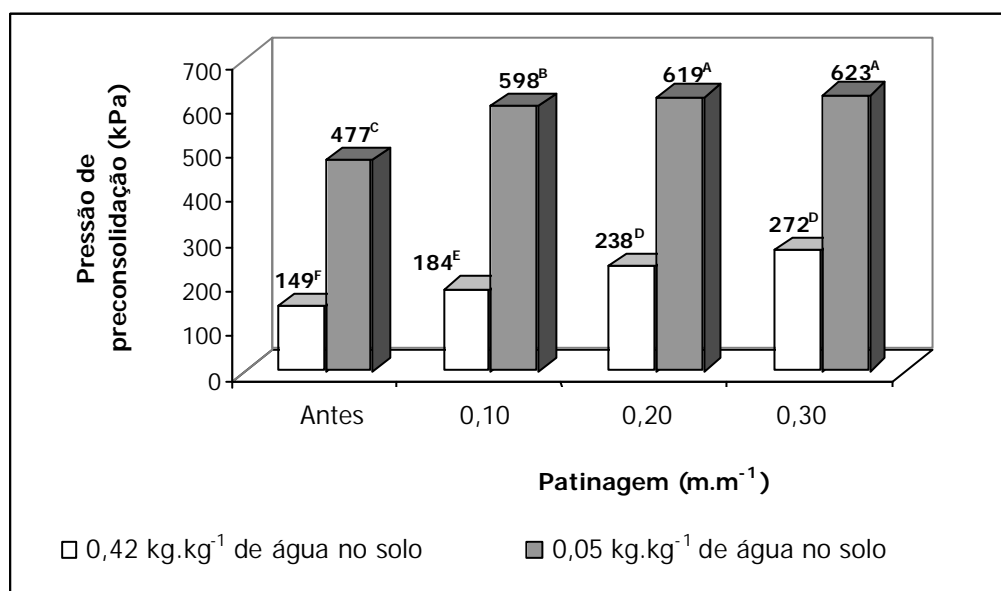


Figura 34 – Pressão de preconsolidação induzida pelo rodado diagonal traseiro com pressão de insuflagem de 168 kPa e níveis de patinação de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, nas duas condições de teor de água no solo.

preconsolidação induziu comportamento semelhante nas duas condições de teor de água no solo, ou seja, as patinagens de 0,20 e 0,30 m.m^{-1} foram iguais estatisticamente e diferentes da patinagem de 0,10 m.m^{-1} .

Na Figura 35, mostram-se as pressões de preconsolidação induzidas pelo rodado diagonal traseiro com pressão de insuflagem de 98 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} , para as duas condições de teor de água no solo. Em cada nível de patinagem, as pressões de preconsolidação diferem entre si. No solo com teor de água de 0,05 kg.kg^{-1} , o aumento na pressão de preconsolidação seguiu comportamento semelhante ao da condição da Figura 34, sendo as patinagens de 0,20 e 0,30 m.m^{-1} iguais estatisticamente e diferentes da patinagem de 0,10 m.m^{-1} .

Nas Figuras 36 e 37, mostram-se as pressões de preconsolidação induzidas pelo rodado radial traseiro com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem, respectivamente, e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} . Observa-se, nessa figura, que na condição de 0,42 kg.kg^{-1} de água no solo, independentemente da pressão de insuflagem, não ocorreu diferença entre as pressões de preconsolidação nas patinagens de 0,10 e 0,20 m.m^{-1} , ocorrendo diferença na patinagem de 0,30 m.m^{-1} . Na condição de 0,05 kg.kg^{-1} de água no solo, também independentemente da pressão de insuflagem, não houve diferença entre as pressões de preconsolidação nas patinagens de 0,20 e 0,30 m.m^{-1} , ocorrendo diferença na patinagem de 0,10 m.m^{-1} .

4.4. Efeito do tráfego na resistência à penetração do solo

4.4.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg^{-1}

Na Figura 38, mostra-se o efeito do tráfego do trator agrícola acoplado com rodados diagonais a 168 kPa de pressão de insuflagem sobre os valores de resistência à penetração, determinados antes e depois do tráfego em condições de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} de patinagem dos rodados. Os valores de resistência à penetração se referem à profundidade de 0,05 m, similar à profundidade de coleta das amostras para ensaio de compressibilidade.

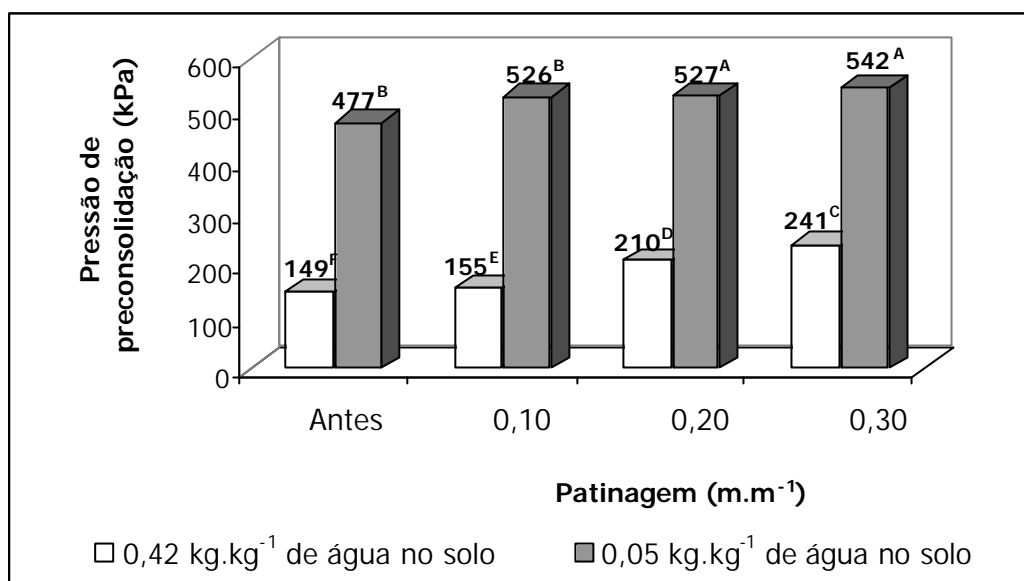


Figura 35 – Pressão de preconsolidação induzida pelo rodado diagonal traseiro com pressão de insuflagem de 98 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, nas duas condições de teor de água no solo.

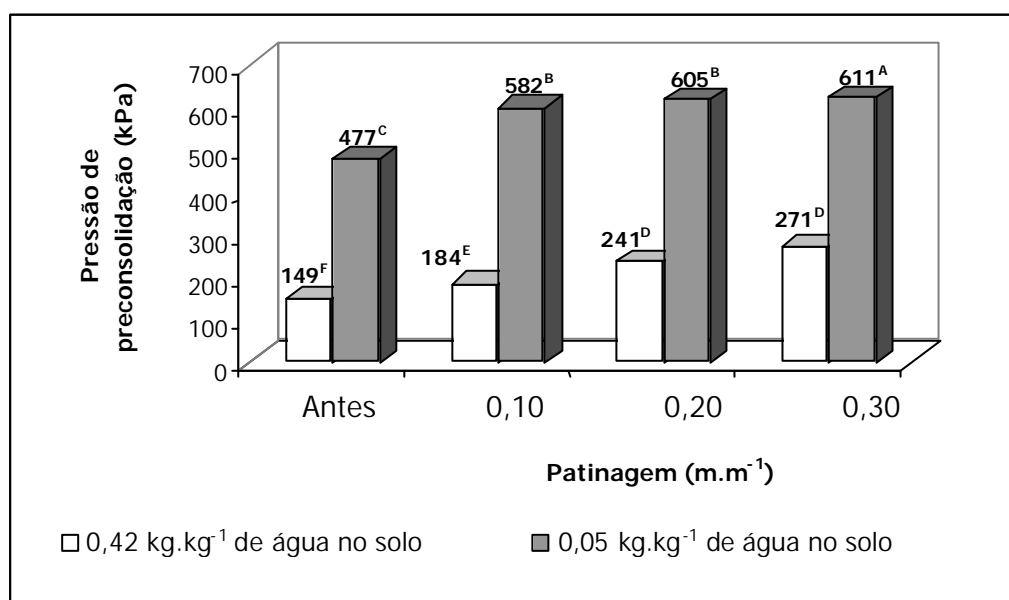


Figura 36 – Pressão de preconsolidação induzida pelo rodado radial traseiro com pressão de insuflagem de 168 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, nas duas condições de teor de água no solo.

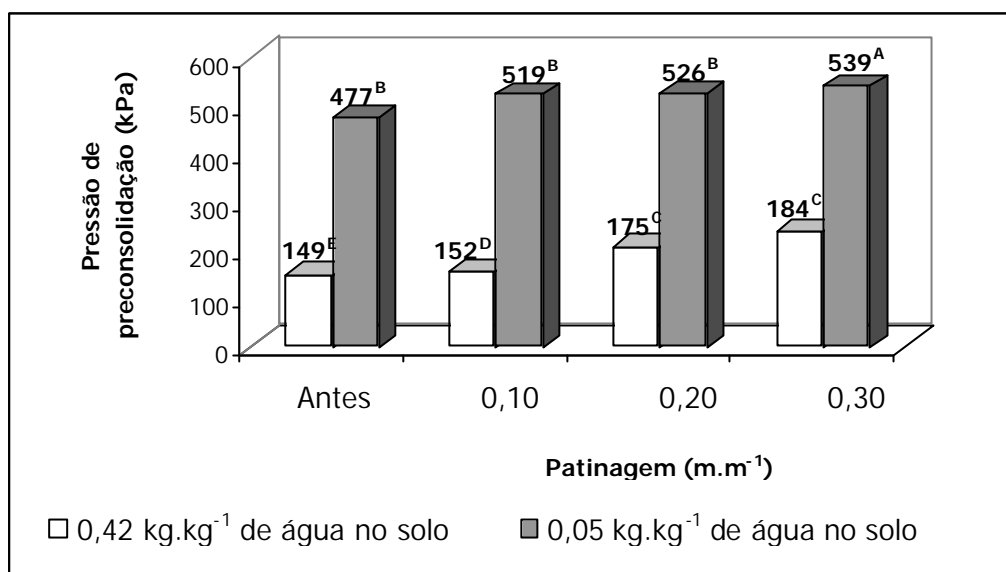


Figura 37 – Pressão de preconsolidação induzida pelo rodado radial traseiro com pressão de insuflagem de 98 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, nas duas condições de teor de água no solo.

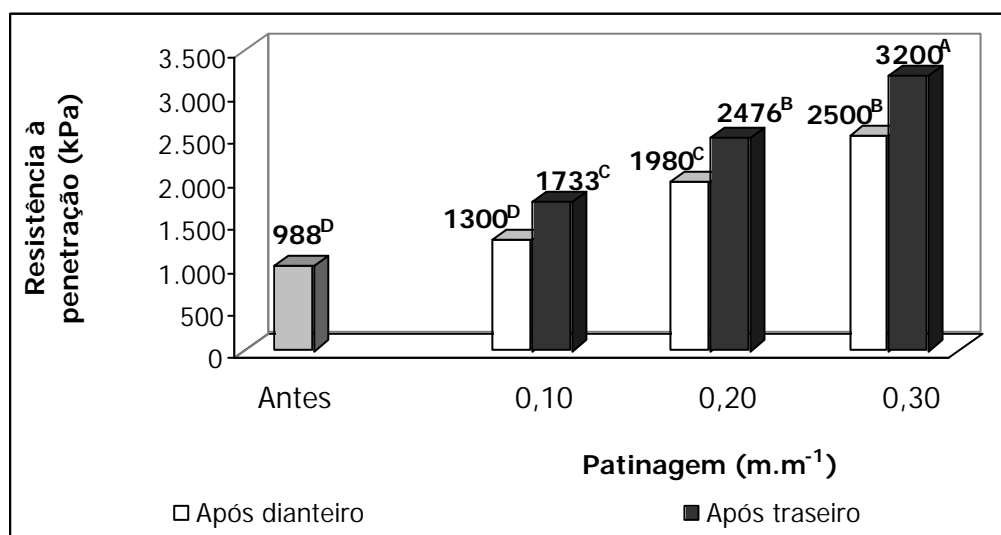


Figura 38 – Resistência à penetração em função da patinagem do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Não houve diferença significativa ao se compararem as condições antes e depois do rodado dianteiro com $0,10 \text{ m.m}^{-1}$ de patinagem. Nas demais condições de tráfego impostas, houve diferença significativa. Na patinagem de $0,30 \text{ m.m}^{-1}$, observou-se a maior resistência à penetração do solo (Figura 38).

Quando a pressão de insuflagem foi reduzida para 98 kPa (Figura 39), a variação de resistência à penetração em função da patinagem apresentou comportamento semelhante ao descrito anteriormente, porém com valores menores.

Nas Figuras 40 e 41, apresenta-se o efeito do tráfego na resistência à penetração, para condição de rodado radial a 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem, respectivamente. Para a primeira condição de pressão de insuflagem, observou-se comportamento semelhante ao do rodado diagonal, no qual o rodado dianteiro com $0,10 \text{ m.m}^{-1}$ de patinagem não alterou, de forma significativa, a resistência à penetração, tendo as demais condições efeito significativo. Na segunda condição de pressão de insuflagem, as condições de rodados dianteiro e traseiro a $0,10$ e dianteiro a $0,20 \text{ m.m}^{-1}$ de patinagem não alteraram, de forma significativa, a resistência à penetração, com a ressalva de que as demais condições resultaram em alterações significativas.

No Quadro 35, mostra-se o aumento da resistência à penetração, em valores percentuais, para condição de tráfego dos rodados traseiros e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$, comparativamente à condição antes do tráfego.

A análise da resistência à penetração induzida pelo rodado diagonal indicou que, independentemente da patinagem, ocorre diferença estatística entre pressões de insuflagem, com os maiores valores de resistência à penetração atribuídos à maior pressão de insuflagem (Quadro 35). A análise da resistência à penetração induzida pelo rodado radial evidenciou que, na patinagem de $0,10 \text{ m.m}^{-1}$, não ocorreu diferença entre pressões de insuflagem. Nas demais condições de patinagem, houve diferença entre pressões de insuflagem, com os maiores valores de resistência à penetração atribuídos à maior pressão de insuflagem.

Ao analisar o efeito da patinagem (Quadro 35), observou-se que, independentemente do tipo de rodado e da pressão de insuflagem, ocorreu diferença significativa entre patinagens, com maiores valores atribuídos à patinagem de $0,30 \text{ m.m}^{-1}$.

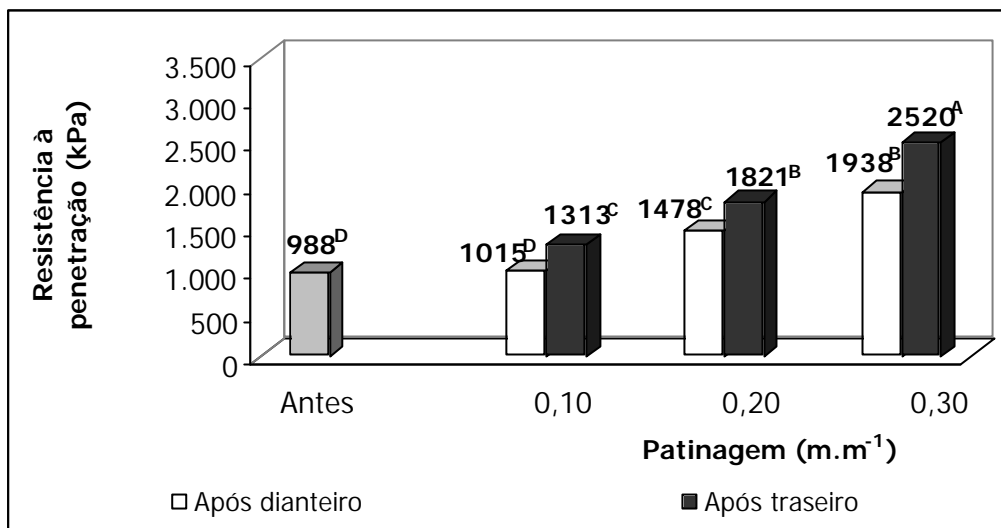


Figura 39 – Resistência à penetração em função da patinagem do rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

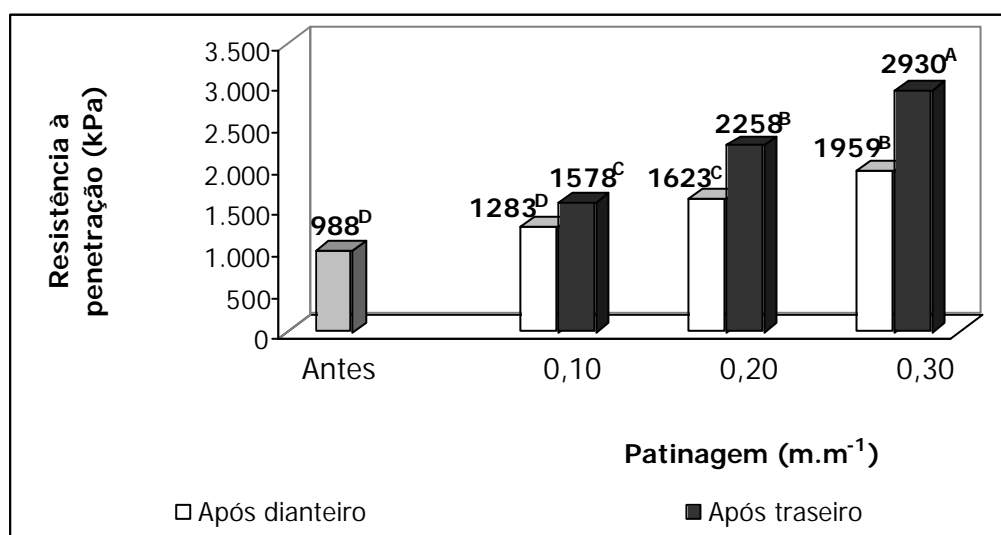


Figura 40 – Resistência à penetração em função da patinagem do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

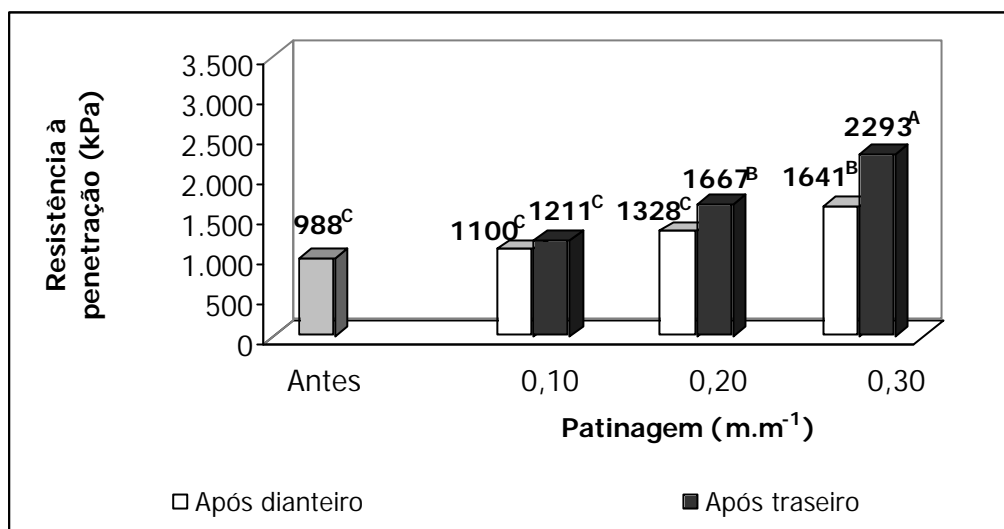


Figura 41 – Resistência à penetração em função da patinagem do rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quadro 35 – Incrementos nos valores de resistência à penetração devido ao tráfego do trator agrícola em função do tipo de rodado, da pressão de insuflagem e da patinagem

Tipo de rodado	Pressão de insuflagem (kPa)	Incremento de resistência à penetração (%)		
		Patinagem (m.m ⁻¹)		
		0,10	0,20	0,30
Diagonal	168	75 ^{Ca}	150 ^{Ba}	223 ^{Aa}
	98	32 ^{Cb}	84 ^{Bb}	153 ^{Ab}
Radial	168	59 ^{Cb}	128 ^{Ba}	196 ^{Ab}
	98	22 ^{Cb}	68 ^{Bb}	132 ^{Ac}

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Comparando os resultados mostrados no Quadro 35, notou-se que o menor incremento em resistência à penetração ocorreu na condição de patinagem de $0,10 \text{ m.m}^{-1}$, sendo atribuído ao rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem, seguido de diagonal com 98 kPa, radial com 168 kPa e diagonal com 168 kPa.

4.4.2. Teor de água no solo de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$

Na Figura 42, mostra-se o efeito do tráfego do trator agrícola acoplado com rodados diagonais a 168 kPa de pressão de insuflagem, nos valores de resistência à penetração, determinados antes e depois do tráfego sob condições de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$ de patinagem dos rodados. Observa-se, nessa figura, que não houve alteração significativa na resistência à penetração ao comparar as condições antes e depois do tráfego dos rodados dianteiro e traseiro com $0,10$ e dianteiro com $0,20 \text{ m.m}^{-1}$ de patinagem, porém ocorrendo alteração significativa nas demais condições.

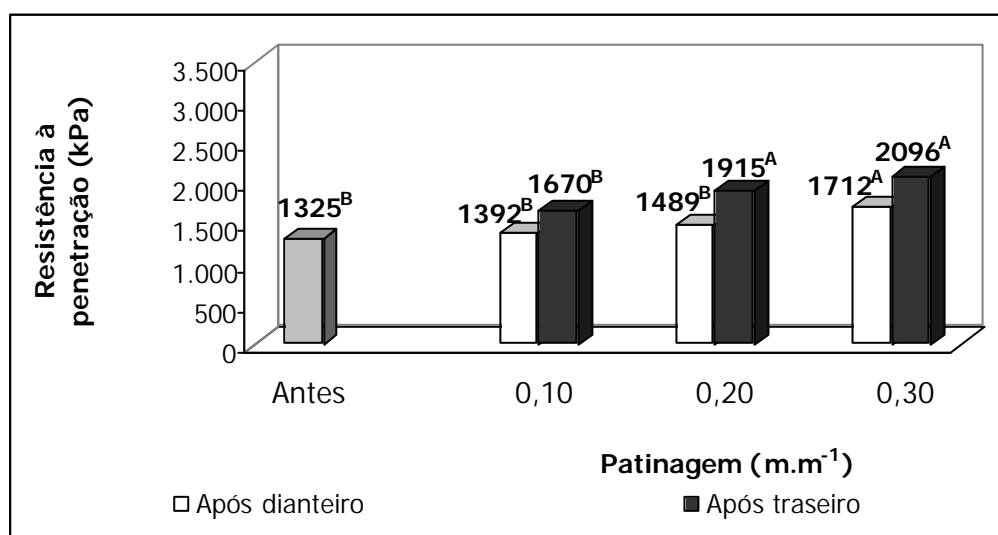


Figura 42 – Resistência à penetração em função da patinagem do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na condição de rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem (Figura 43), não houve alteração significativa para tráfego dos rodados dianteiro e traseiro com 0,10 e dianteiros com 0,20 e 0,30 m.m^{-1} de patinagem. Nas demais condições de tráfego, houve alteração significativa.

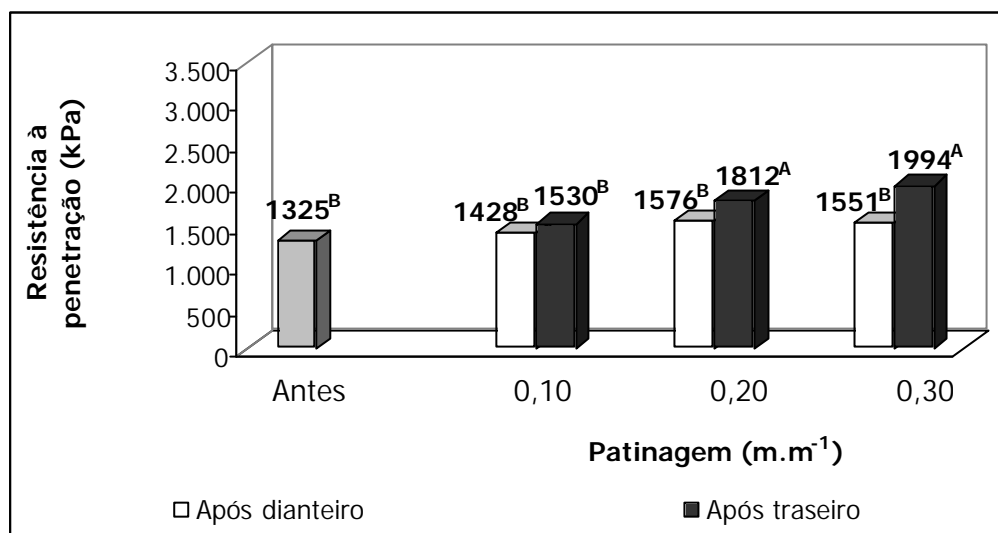


Figura 43 – Resistência à penetração em função da patinagem do rodado diagonal a 98 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nas Figuras 44 e 45, mostra-se o efeito do tráfego do trator agrícola acoplado com rodados radiais com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem, respectivamente, e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} . Na condição de 168 kPa de pressão de insuflagem, observou-se que não houve alteração significativa da resistência à penetração no tráfego dos rodados dianteiro e traseiro com 0,10 e dianteiros com 0,20 e 0,30 m.m^{-1} de patinagem. Nas demais condições de tráfego, houve alteração significativa (Figura 44). Na condição de pressão de insuflagem de 98 kPa (Figura 45), houve alteração significativa da resistência à penetração somente no tráfego do rodado traseiro com 0,30 m.m^{-1} de patinagem.

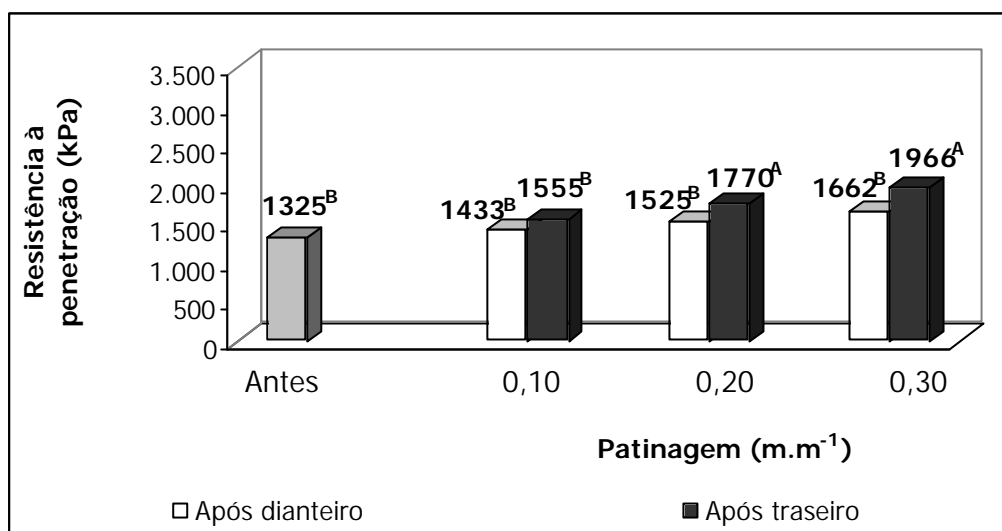


Figura 44 – Resistência à penetração em função da patinagem do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

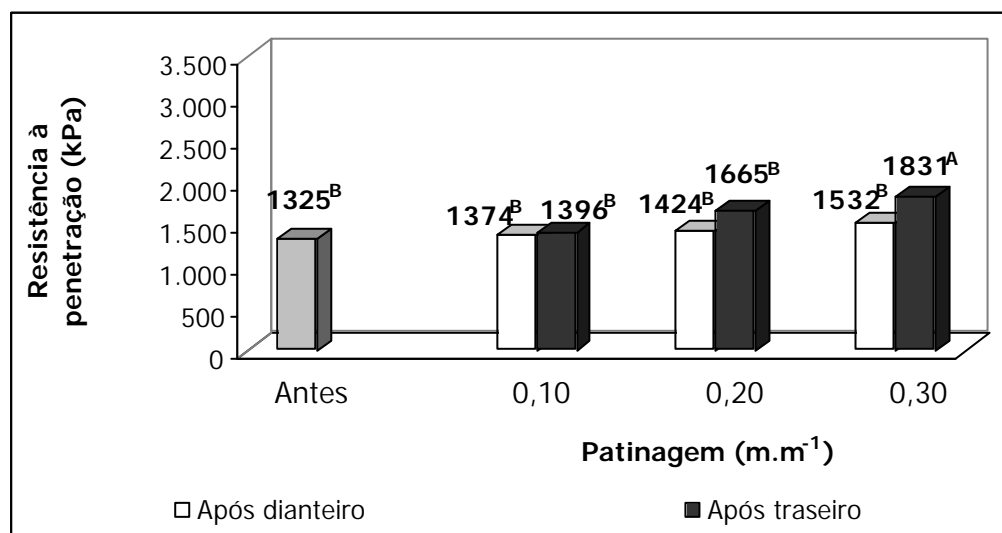


Figura 45 – Resistência à penetração em função da patinagem do rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No Quadro 36, mostra-se o incremento de resistência à penetração, em valores percentuais, na condição de tráfego dos rodados traseiros e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, comparativamente à condição antes do tráfego.

Quadro 36 – Incrementos nos valores de resistência à penetração devido ao tráfego do trator agrícola em função do tipo de rodado, da pressão de insuflagem e da patinagem

Tipo de rodado	Pressão de insuflagem (kPa)	Incremento da resistência à penetração (%)		
		Patinagem (m.m ⁻¹)		
		0,10	0,20	0,30
Diagonal	168	126 ^{Ba}	144 ^{Aa}	158 ^{Aa}
	98	115 ^{Ba}	136 ^{Aa}	150 ^{Aa}
Radial	168	117 ^{Ba}	133 ^{Aa}	148 ^{Aa}
	98	105 ^{Ba}	125 ^{Aa}	138 ^{Aa}

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A análise da resistência à penetração nas condições de pressão de insuflagem impostas indica que, independentemente do tipo de rodado e da patinagem, não ocorreu diferença estatística na resistência à penetração (Quadro 36), evidenciando que no teor de água em questão não houve efeito da pressão de insuflagem.

Ao analisar o efeito da patinagem (Quadro 36), observou-se que, independentemente do tipo de rodado e da pressão de insuflagem, patinagens de 0,20 e 0,30 m.m⁻¹ não diferiram significativamente, ocorrendo diferença significativa ao serem comparadas com a patinagem de 0,10 m.m⁻¹.

Comparando os resultados do Quadro 36, notou-se que o menor incremento da resistência à penetração, de forma semelhante à da condição de 0,42 kg.kg⁻¹ de água no solo, ocorreu na condição de patinagem de 0,10 m.m⁻¹, sendo atribuído ao rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem, seguido de diagonal com 98 kPa, radial com 168 kPa e diagonal com 168 kPa.

Na Figura 46, mostra-se a resistência à penetração induzida pelo rodado diagonal traseiro, com pressão de insuflagem de 168 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} , nas duas condições de teor de água no solo. Observa-se, nessa figura, que na condição antes do tráfego ocorreu diferença significativa em resistência à penetração ao comparar os teores de água no solo. Na condição após o tráfego e nas patinagens de 0,10 e 0,20 m.m^{-1} , não ocorreu diferença ao se compararem os teores de água no solo; já na patinagem de 0,30 m.m^{-1} houve diferença significativa. Na condição de 0,42 kg.kg^{-1} de água no solo, aumento em patinagem implica aumento significativo em resistência à penetração. Na condição de 0,05 kg.kg^{-1} de água no solo, patinagens de 0,20 e 0,30 m.m^{-1} não diferiram significativamente, ocorrendo diferença ao serem comparadas com a patinagem de 0,10 m.m^{-1} .

Na Figura 47, mostra-se a resistência à penetração induzida pelo rodado diagonal traseiro, com pressão de insuflagem de 98 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} , nas duas condições de teor de água no solo. Na condição de 0,42 kg.kg^{-1} de teor de água no solo, a resistência à penetração difere entre si, ao comparar os efeitos da patinagem. No solo com teor de água de 0,05 kg.kg^{-1} , o aumento na resistência à penetração seguiu comportamento semelhante à condição da Figura 46, sendo as patinagens de 0,20 e 0,30 m.m^{-1} iguais estatisticamente e diferentes da patinagem de 0,10 m.m^{-1} .

Na Figura 48, apresenta-se a resistência à penetração induzida pelo rodado radial traseiro, com pressão de insuflagem de 168 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} , nas duas condições de teor de água no solo. O comportamento da resistência à penetração assemelha-se à condição de rodado diagonal nas mesmas circunstâncias, ou seja, valores iguais de resistência à penetração nas patinagens de 0,10 e 0,20 m.m^{-1} e diferentes na patinagem de 0,30 m.m^{-1} .

Na Figura 49 é mostrada a resistência à penetração induzida pelo rodado radial traseiro com pressão de insuflagem de 98 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} , nas duas condições de teor de água no solo. Na patinagem de 0,10 m.m^{-1} , ocorreu diferença em resistência à penetração em comparação com o efeito do teor de água no solo; nas demais condições de patinagem, não houve diferença significativa em resistência à penetração, em cada nível de patinagem.

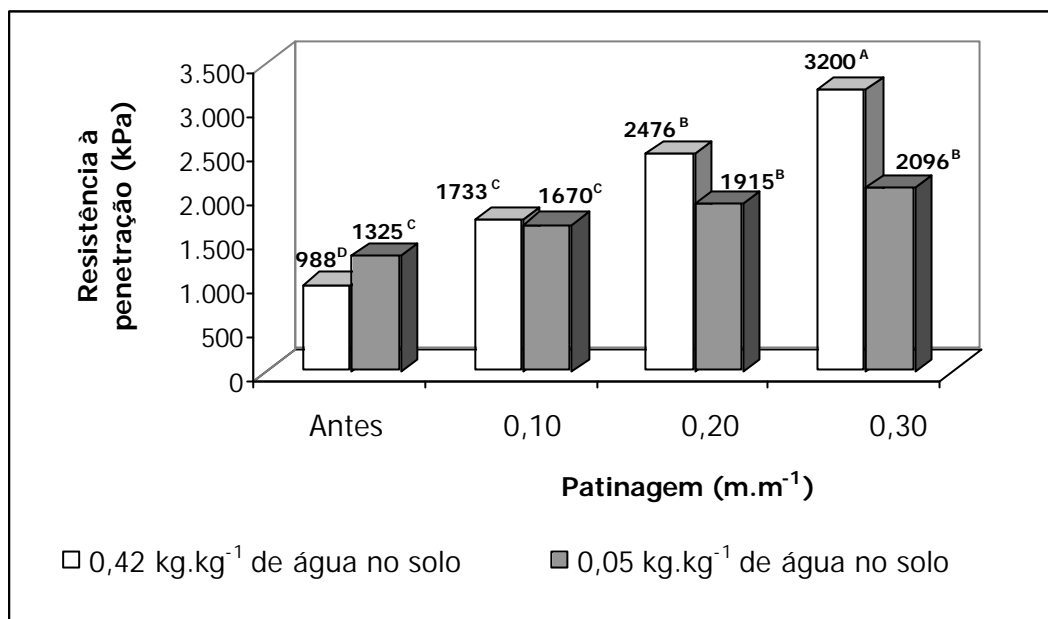


Figura 46 – Resistência à penetração induzida pelo rodado diagonal traseiro com pressão de insuflagem de 168 kPa e níveis de patinação de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, nas duas condições de teor de água no solo.

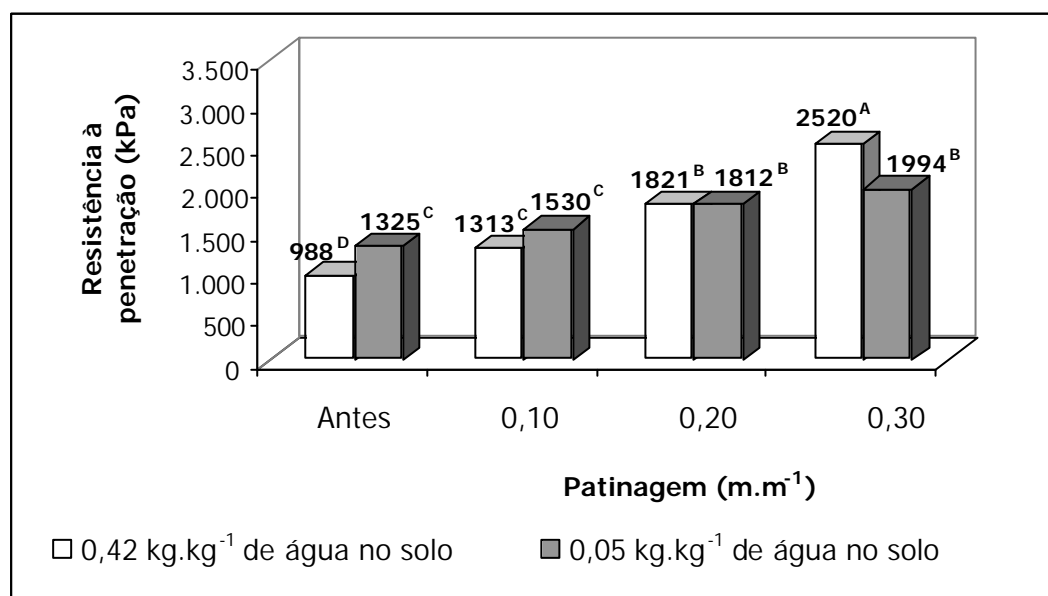


Figura 47 – Resistência à penetração induzida pelo rodado diagonal traseiro com pressão de insuflagem de 98 kPa e níveis de patinação de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, nas duas condições de teor de água no solo.

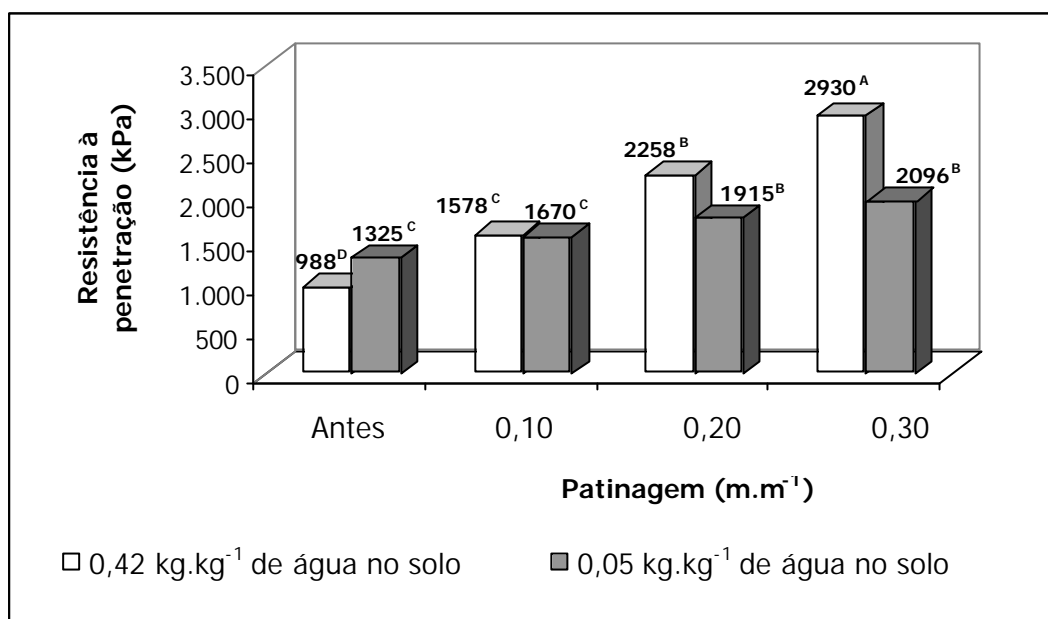


Figura 48 – Resistência à penetração induzida pelo rodado radial traseiro com pressão de insuflagem de 168 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, nas duas condições de teor de água no solo.

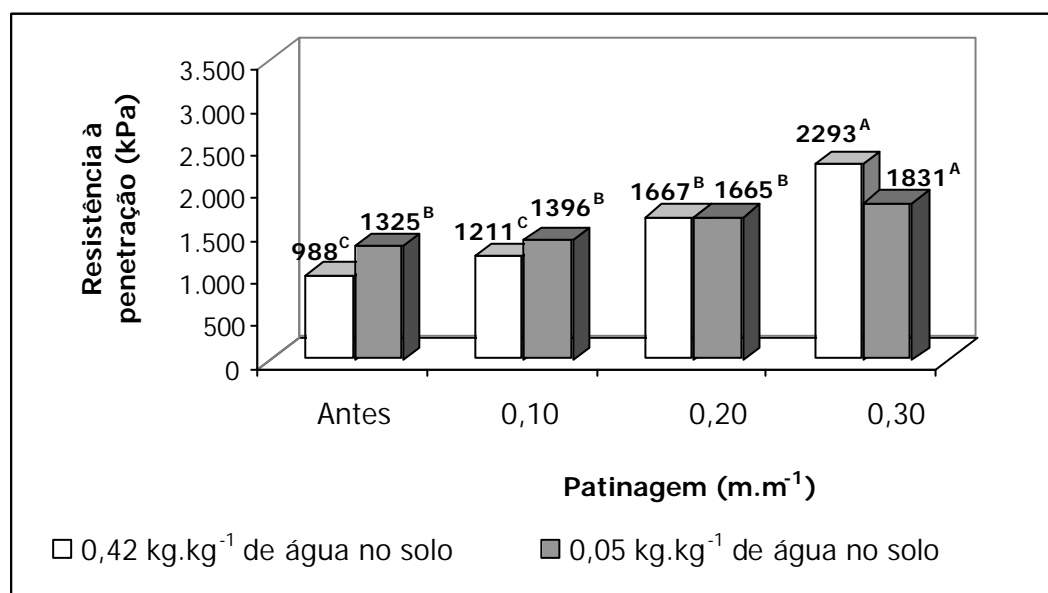


Figura 49 – Resistência à penetração induzida pelo rodado radial traseiro com pressão de insuflagem de 98 kPa e níveis de patinagem de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹, nas duas condições de teor de água no solo.

4.5. Relação entre pressão de preconsolidação e resistência à penetração

Na Figura 50, mostra-se a relação entre pressão de preconsolidação e resistência à penetração na condição de teor de água no solo de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$, e a Figura 51 ilustra a mesma relação para a condição de teor de água no solo de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$. Observa-se, nessa figura, que aumentos na resistência à penetração acarretam aumentos em pressão de preconsolidação, sendo de comportamento linear em ambas as condições de teor de água no solo.

As equações foram comparadas pelo procedimento proposto por SNEDECOR e COCHARAN (1989). Nos Quadros 37 e 38, apresenta-se a comparação entre as equações obtidas para teor de água no solo de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$ e $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$, respectivamente. Nota-se também nesse quadro que, dentro de cada condição de teor de água no solo, as equações não diferiram significativamente, em comparação com os parâmetros comportamento, inclinação e intercepto.

No Quadro 39, comparam-se condições operacionais dos rodados e teor de água no solo. As equações foram diferentes em todas as condições testadas.

4.6. Efeito do tráfego sobre a resistência ao cisalhamento do solo

4.6.1. Teor de água no solo de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$

Na Figura 52, mostram-se as curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de $0,10$, $0,20$ e $0,30 \text{ m.m}^{-1}$. Observa-se, nessa figura, que em todas as condições as curvas se deslocaram para regiões de maiores tensões cisalhantes. Ao reduzir a pressão do rodado diagonal para 98 kPa , observou-se que, na patinagem de $0,10 \text{ m.m}^{-1}$, não houve deslocamento da curva tensão-deformação para regiões de maiores tensões cisalhantes, ocorrendo esse deslocamento nas demais condições de patinagem (Figura 53).

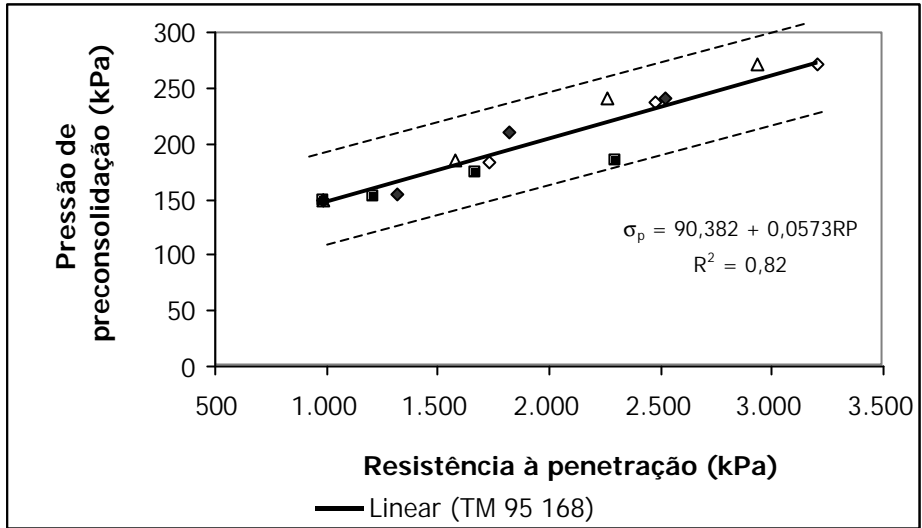


Figura 50 – Retas de pressão de preconsolidação em função da resistência à penetração para condição de teor de água no solo de 0,42 kg.kg⁻¹.

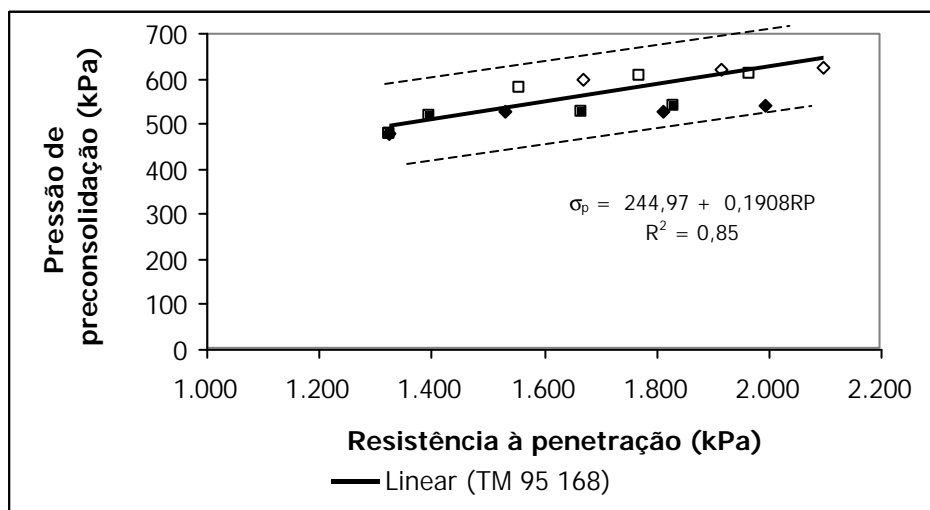


Figura 51 – Retas de pressão de preconsolidação em função da resistência à penetração para condição de teor de água no solo de 0,05 kg.kg⁻¹.

Quadro 37 – Comparação das equações pressão de preconsolidação = f(resistência à penetração) para condição de teor de água no solo de 0,42 kg.kg⁻¹

Equação comparada	Parâmetro	Valor de F
TM 95 168 X TM 95 98	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,7 ^{ns}
	Intercepto	2,7 ^{ns}
TM 700 168 X TM 700 98	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	2,9 ^{ns}
	Intercepto	1,1 ^{ns}
TM 95 168 X TM 700 168	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,3 ^{ns}
	Intercepto	2,7 ^{ns}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 38 – Comparação das equações de pressão de preconsolidação = f(resistência à penetração) para condição de teor de água no solo de 0,05 kg.kg⁻¹

Equação comparada	Parâmetro	Valor de F
TM 95 168 X TM 95 98	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	1,7 ^{ns}
	Intercepto	2,3 ^{ns}
TM 700 168 X TM 700 98	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,0 ^{ns}
	Intercepto	1,9 ^{ns}
TM 95 168 X TM 700 168	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,4 ^{ns}
	Intercepto	0,7 ^{ns}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 39 – Comparação das equações entre os teores de água no solo

Equação comparada	Parâmetro	Valor de F
TM 95 168/0,42 X TM 95 168/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,7 ^{ns}
	Intercepto	6,3 [*]
TM 95 168/0,42 X TM 95 98/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	5,7 [*]
	Intercepto	6,1 [*]
TM 95 168/0,42 X TM 700 168/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,3 ^{ns}
	Intercepto	7,7 [*]
TM 95 168/0,42 X TM 700 98/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	8,3 [*]
	Intercepto	12,2 ^{**}
TM 95 98/0,42 X TM 95 98/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	4,3 [*]
	Intercepto	5,9 [*]
TM 95 98/0,42 X TM 700 168/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,3 ^{ns}
	Intercepto	7,7 [*]
TM 95 98/0,42 X TM 700 98/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	7,6 [*]
	Intercepto	7,2 [*]

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

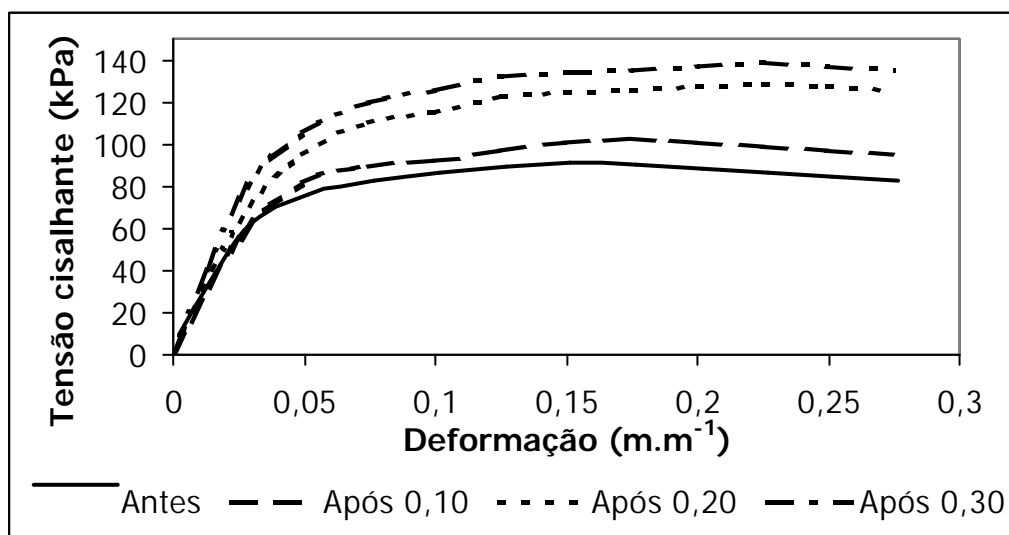


Figura 52 – Curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

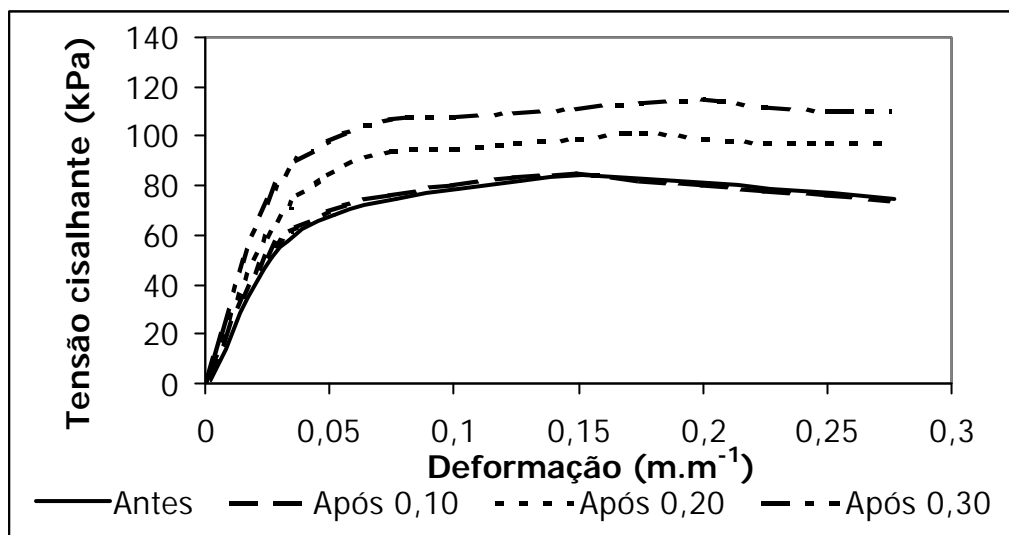


Figura 53 – Curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

Nas Figuras 54 e 55, apresentam-se as curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado radial com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem, respectivamente, e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹. De forma semelhante à do rodado diagonal, o rodado radial na pressão de insuflagem de 168 kPa deslocou as curvas tensão-deformação para regiões de maiores tensões cisalhantes em todas as condições de patinagem (Figura 54). Ao se reduzir a pressão de insuflagem do rodado para 98 kPa, também de forma semelhante à do rodado diagonal, não houve deslocamento da curva tensão-deformação para regiões de maiores tensões cisalhantes na patinagem de 0,10 m.m⁻¹, ocorrendo esse deslocamento nas demais condições de patinagem (Figura 55).

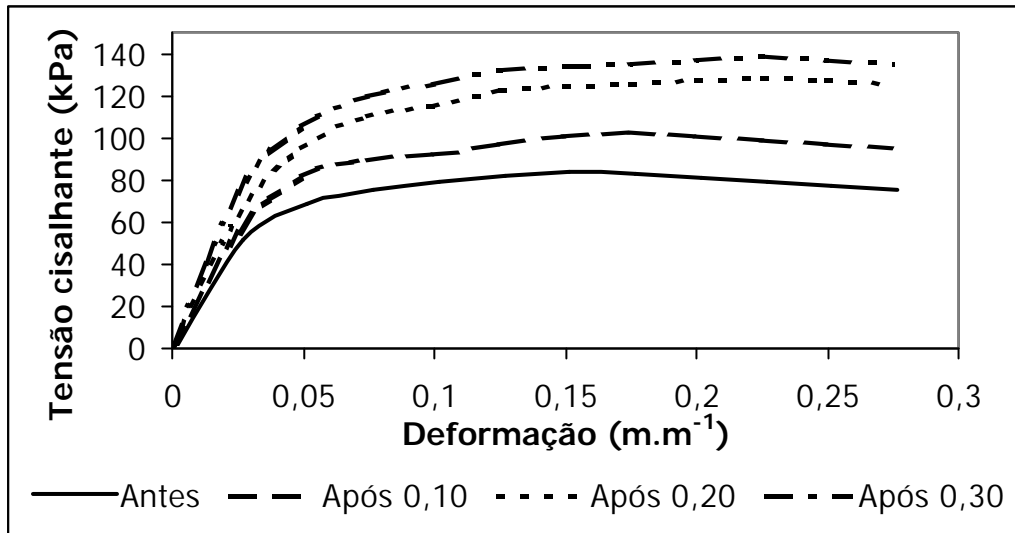


Figura 54 – Curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

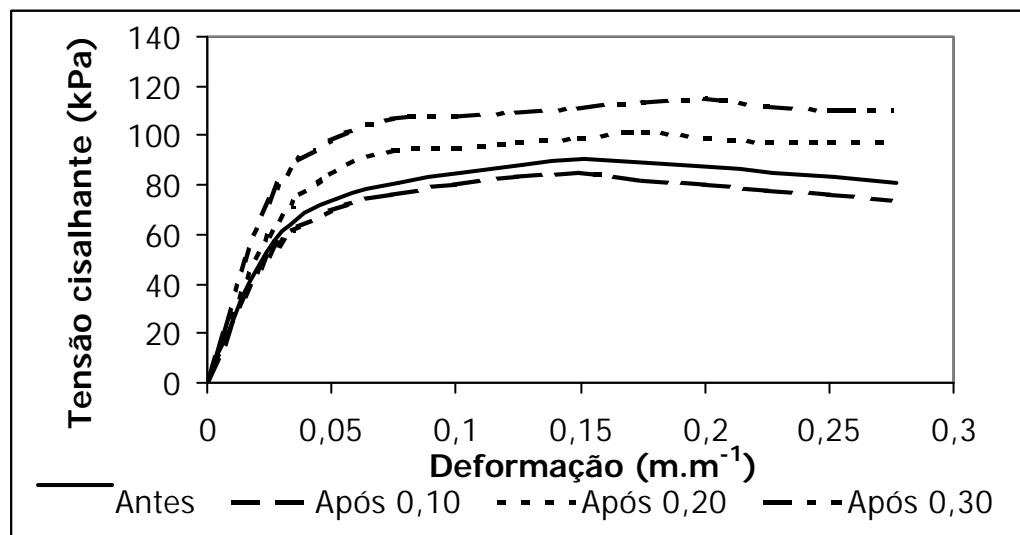


Figura 55 – Curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

4.6.2. Teor de água no solo de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$

Na Figura 56 são mostradas as curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} . Observa-se, nessa figura, que em todas as condições as curvas se deslocaram para regiões de maiores tensões cisalhantes, sendo o maior deslocamento associado à patinagem de 0,30 m.m^{-1} . Ao reduzir a pressão do rodado diagonal para 98 kPa, observou-se que houve deslocamento das curvas tensão-deformação para regiões de maiores tensões cisalhantes, ressaltando-se que as curvas referentes às patinagens de 0,20 e 0,30 m.m^{-1} se mostraram iguais (Figura 57).

Nas Figuras 58 e 59, mostram-se as curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado radial com 168 e 98 kPa de pressão de insuflagem, respectivamente, e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m^{-1} . De forma semelhante à do rodado diagonal, na pressão de insuflagem de 168 kPa as curvas se deslocaram para regiões de maiores tensões cisalhantes, em todas as condições de patinagem (Figura 58). Na pressão de insuflagem de 98 kPa, o rodado radial também apresentou comportamento semelhante ao do rodado diagonal na mesma condição de pressão de insuflagem, ou seja, deslocamento das curvas tensão-deformação para regiões de maiores tensões cisalhantes, com a ressalva de que as curvas referentes às patinagens de 0,20 e 0,30 m.m^{-1} se mostraram iguais (Figura 59).

Na condição de teor de água no solo de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$, não houve diferença significativa entre os valores de tensão cisalhante máxima do solo, ao se compararem as condições antes e depois do tráfego, independentemente do tipo de rodado, da pressão de insuflagem e da patinagem (Quadro 40).

Na condição de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$ de água no solo, os rodados inflados a 168 kPa não mostraram diferença significativa entre os valores de tensão cisalhante máxima antes e depois do tráfego a 0,10 m.m^{-1} de patinagem, evidenciando-se diferença significativa para as demais patinagens, independentemente do tipo de rodado (Quadro 40). Ao reduzir a pressão de insuflagem para 98 kPa, os rodados não exibiram diferença significativa ao comparar antes e depois do tráfego a 0,10 e 0,20 m.m^{-1} de patinagem, apresentando diferença significativa na patinagem de 0,30 m.m^{-1} .

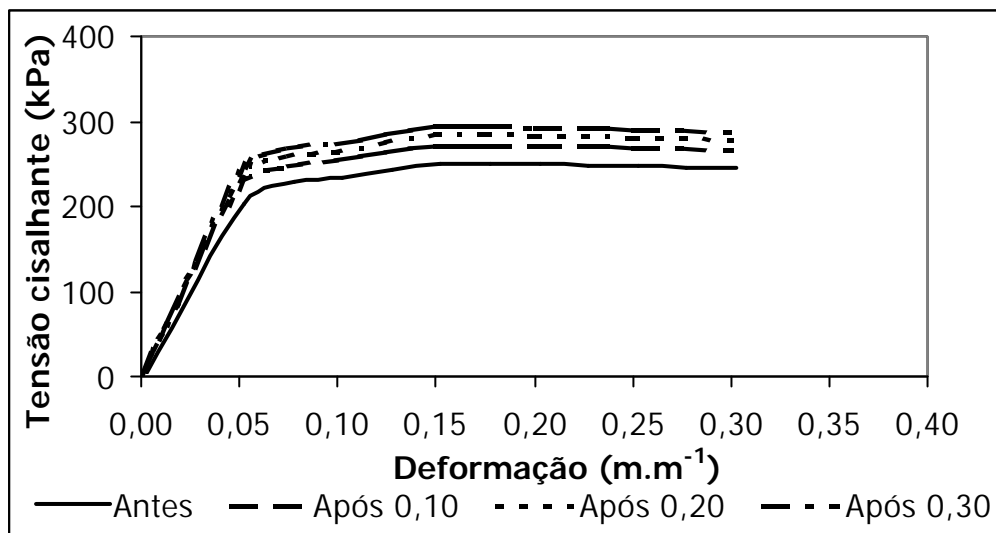


Figura 56 – Curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

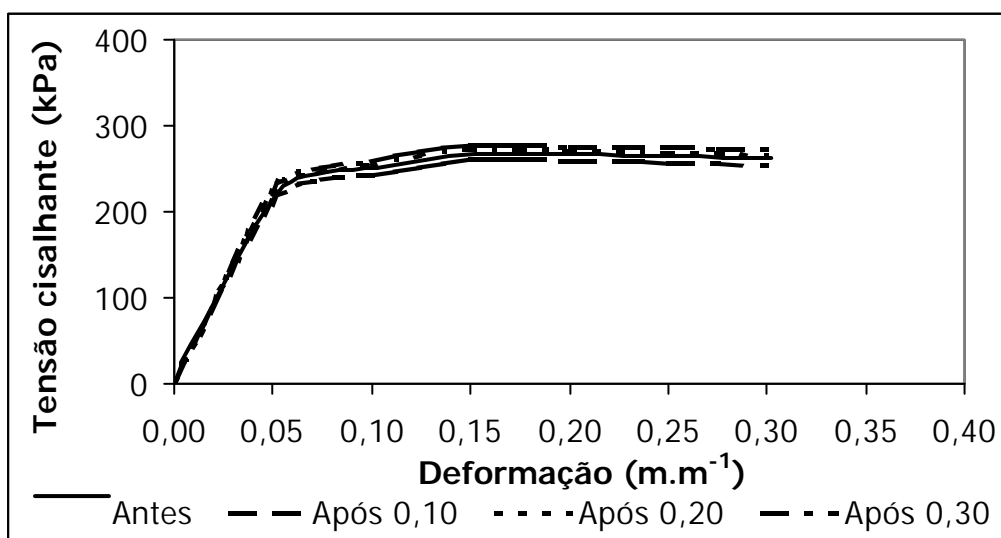


Figura 57 – Curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

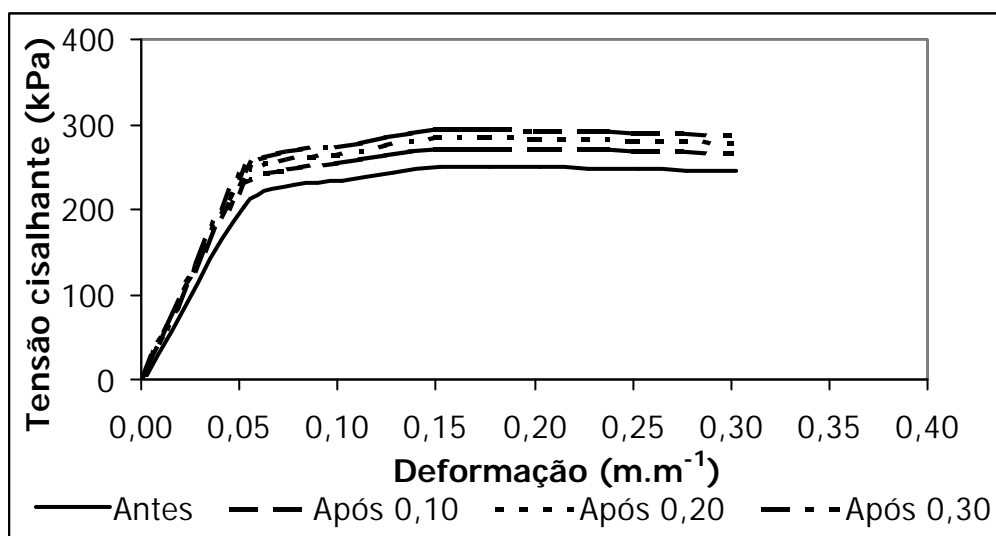


Figura 58 – Curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

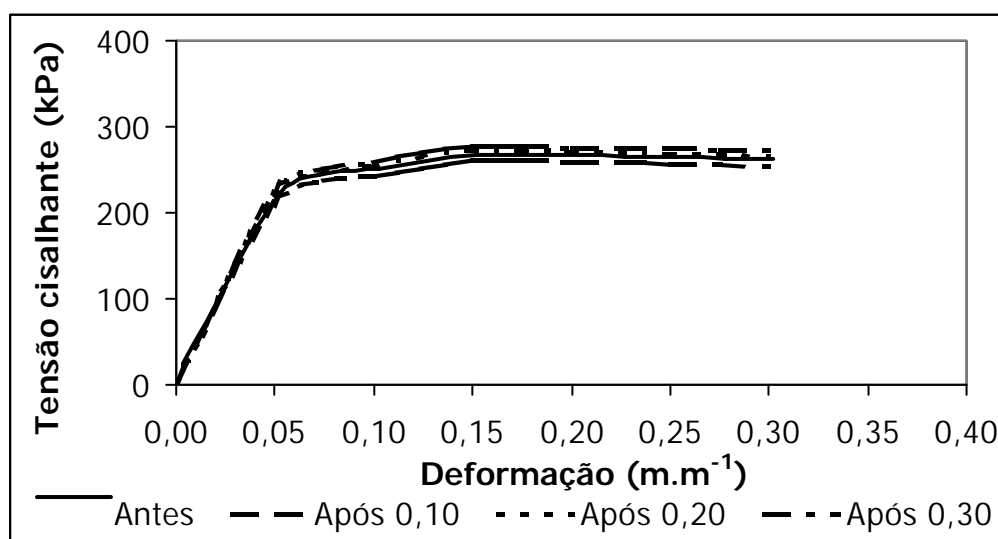


Figura 59 – Curvas tensão-deformação do solo antes e depois do tráfego do rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

Quadro 40 – Valores de tensão cisalhante máxima e deformação máxima das amostras de solo

Tipo de rodado/Pressão de insuflagem	Patinagem (m.m ⁻¹)	Tensão cisalhante máxima (kPa)	Deformação máxima (m.m ⁻¹)
		Água no solo (kg.kg ⁻¹) 0,42/0,05	Água no solo (kg.kg ⁻¹) 0,42/0,05
Rodado diagonal traseiro 168 kPa	Antes	83 ^{Bb} /245 ^{Aa}	0,150 ^{Ba} /0,172 ^{Aa}
	0,10	103 ^{Bb} /271 ^{Aa}	0,172 ^{Ba} /0,181 ^{Aa}
	0,20	129 ^{Ab} /284 ^{Aa}	0,223 ^{Aa} /0,223 ^{Aa}
	0,30	139 ^{Ab} /293 ^{Aa}	0,235 ^{Aa} /0,225 ^{Aa}
Rodado diagonal traseiro 98 kPa	Antes	83 ^{Bb} /245 ^{Aa}	0,150 ^{Ba} /0,150 ^{Aa}
	0,10	85 ^{Bb} /259 ^{Aa}	0,150 ^{Ba} /0,172 ^{Aa}
	0,20	101 ^{Bb} /271 ^{Aa}	0,181 ^{Ba} /0,181 ^{Aa}
	0,30	115 ^{Ab} /276 ^{Aa}	0,216 ^{Aa} /0,209 ^{Aa}
Rodado radial traseiro 168 kPa	Antes	83 ^{Bb} /245 ^{Aa}	0,150 ^{Ba} /0,150 ^{Aa}
	0,10	103 ^{Bb} /270 ^{Aa}	0,170 ^{Ba} /0,170 ^{Aa}
	0,20	131 ^{Ab} /287 ^{Aa}	0,200 ^{Aa} /0,204 ^{Aa}
	0,30	140 ^{Ab} /290 ^{Aa}	0,240 ^{Aa} /0,225 ^{Aa}
Rodado radial traseiro 98 kPa	Antes	83 ^{Bb} /245 ^{Aa}	0,150 ^{Ba} /0,150 ^{Aa}
	0,10	85 ^{Bb} /258 ^{Aa}	0,150 ^{Ba} /0,178 ^{Aa}
	0,20	98 ^{Bb} /270 ^{Aa}	0,178 ^{Ba} /0,180 ^{Aa}
	0,30	117 ^{Ab} /280 ^{Aa}	0,223 ^{Aa} /0,213 ^{Aa}

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.7. Relação entre resistência ao cisalhamento do solo e resistência à penetração

Nas Figuras 60 e 61, mostra-se a relação entre resistência do solo ao cisalhamento e resistência à penetração, para as condições de teor de água no solo de 0,42 e 0,05 kg.kg⁻¹, respectivamente. Observa-se nessas figuras que, de forma análoga à relação pressão de preconsolidação-resistência à penetração, a resistência do solo ao cisalhamento apresenta boa correlação com resistência à penetração, cujos aumentos em resistência à penetração acarretam aumentos em resistência ao cisalhamento do solo de forma linear.

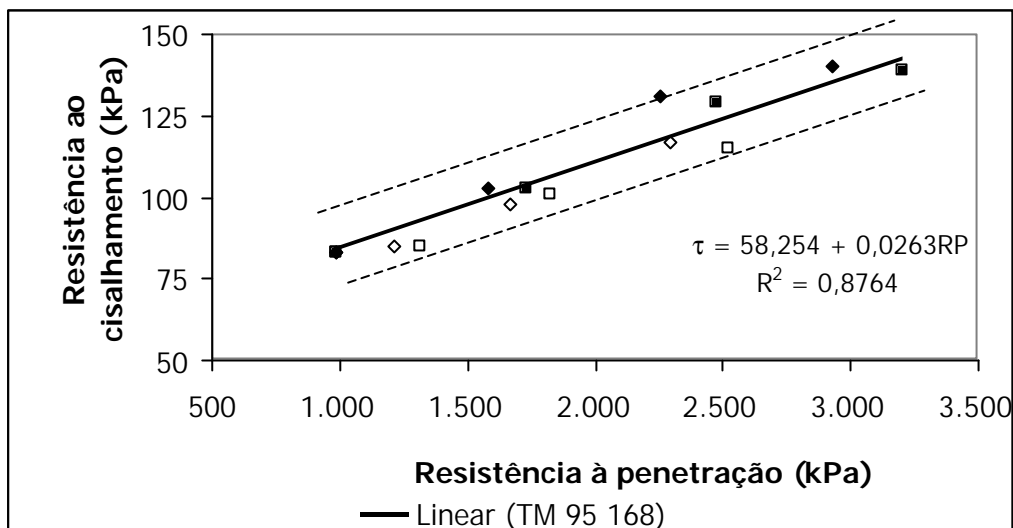


Figura 60 – Retas de resistência ao cisalhamento do solo, em função da resistência à penetração, para condição de teor de água no solo de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$.

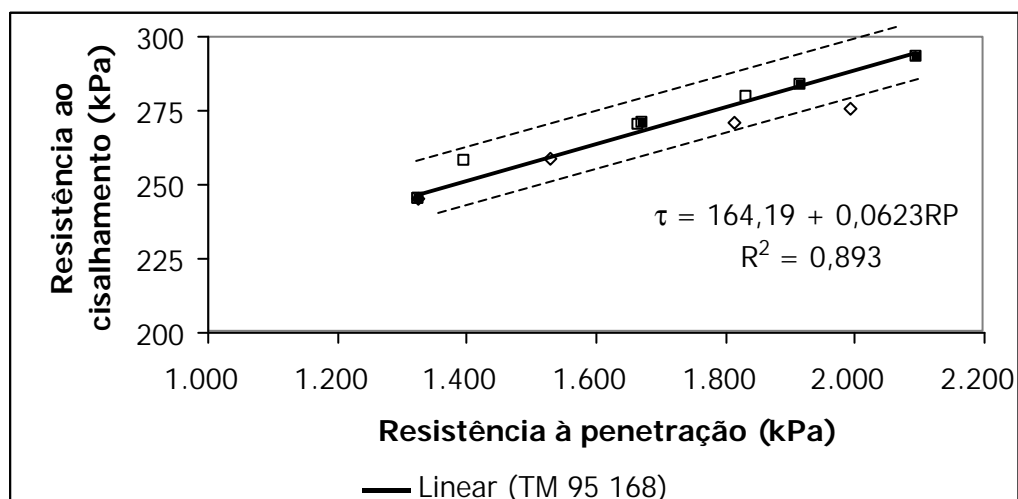


Figura 61 – Retas de resistência ao cisalhamento do solo, em função da resistência à penetração, para condição de teor de água no solo de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$.

As equações foram comparadas pelo procedimento proposto por SNEDECOR e COCHRAN (1989). Nos Quadros 41 e 42, mostra-se a comparação entre as equações obtidas para teor de água no solo de 0,42 kg.kg⁻¹ e 0,05 kg.kg⁻¹, respectivamente. Nota-se nesses quadros que, dentro de cada condição de teor de água no solo, as equações não diferiram significativamente.

Quadro 41 – Comparação das equações de resistência ao cisalhamento= f(resistência à penetração) para condição de teor de água no solo de 0,42 kg.kg⁻¹

Equação comparada	Parâmetro	Valor de F
TM 95 168 X TM 95 98	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	1,7 ^{ns}
	Intercepto	2,6 ^{ns}
TM 700 168 X TM 700 98	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,9 ^{ns}
	Intercepto	1,2 ^{ns}
TM 95 168 X TM 700 168	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	2,3 ^{ns}
	Intercepto	2,7 ^{ns}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 42 – Comparação das equações de resistência ao cisalhamento= f(resistência à penetração) para condição de teor de água no solo de 0,05 kg.kg⁻¹

Equação comparada	Parâmetro	Valor de F
TM 95 168 X TM 95 98	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	1,7 ^{ns}
	Intercepto	2,9 ^{ns}
TM 700 168 X TM 700 98	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,5 ^{ns}
	Intercepto	2,9 ^{ns}
TM 95 168 X TM 700 168	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	1,4 ^{ns}
	Intercepto	0,7 ^{ns}

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

No Quadro 43, comparam-se condições operacionais dos rodados e o teor de água no solo. O comportamento e a inclinação das equações mostraram-se de alteração não-significativa para todas as condições testadas, já o intercepto se apresentou diferente, de forma significativa, para todas as condições, com a ressalva de que isso torna as equações testadas diferentes entre si, pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

Quadro 43 – Comparação das equações entre os teores de água no solo

Equação comparada	Parâmetro	Valor de F
TM 95 168/0,42 X TM 95 168/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	4,7 ^{ns}
	Intercepto	7,3 [*]
TM 95 168/0,42 X TM 95 98/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	2,7 ^{ns}
	Intercepto	6,1 [*]
TM 95 168/0,42 X TM 700 168/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,3 ^{ns}
	Intercepto	6,7 [*]
TM 95 168/0,42 X TM 700 98/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,3 ^{ns}
	Intercepto	10,2 ^{**}
TM 95 98/0,42 X TM 95 98/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	4,3 ^{ns}
	Intercepto	5,8 [*]
TM 95 98/0,42 X TM 700 168/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	3,3 ^{ns}
	Intercepto	9,7 [*]
TM 95 98/0,42 X TM 700 98/0,05	Equação	1,0 ^{ns}
	Inclinação	4,0 ^{ns}
	Intercepto	11,2 [*]

** Significativo (P<0,01), * Significativo (P<0,05) e ns Não-significativo (P>0,05), pelo procedimento de SNEDECOR e COCHRAN (1989).

4.8. Deformação superficial do solo

4.8.1. Teor de água no solo de 0,42 kg.kg⁻¹

Nas Figuras 62 a 65, mostra-se a deformação superficial causada pelo tráfego dos rodados testados e, no Quadro 44, a deformação do solo, medida no centro da banda de rodagem, após o tráfego do trator agrícola, em suas diferentes condições operacionais. O rodado diagonal, inflado com 168 kPa, não apresentou diferença significativa entre os valores de deformação nas patinagens de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹. A patinagem de 0,30 m.m⁻¹ diferiu significativamente das demais condições. Ao se reduzir a pressão de insuflagem do rodado diagonal para 98 kPa, não houve diferença significativa entre deformações em todos os níveis de patinagem. Ao comparar as pressões de insuflagem, observaram-se diferenças significativas entre deformações nas patinagens de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹, com maiores valores atribuídos à pressão de 168 kPa. A deformação não exibiu diferença significativa na patinagem de 0,30 m.m⁻¹ pela comparação das pressões de insuflagem impostas ao rodado diagonal (Quadro 44).

O rodado radial a 168 kPa de pressão de insuflagem apresentou comportamento semelhante ao do rodado diagonal, na mesma condição de pressão de insuflagem, ou seja, patinagens de 0,10 e 0,20 m.m⁻¹, não apresentando diferença significativa entre deformações e patinagem de 0,30 m.m⁻¹ diferindo das demais (Quadro 44). Ao reduzir a pressão de insuflagem do rodado radial para 98 kPa, também se observou comportamento semelhante ao do rodado diagonal na mesma condição, ou seja, não ocorreu diferença significativa entre deformações nas diferentes patinagens.

Pela comparação entre tipos de rodados, em cada condição de pressão de insuflagem e patinagem, evidenciou-se que não ocorreu diferença significativa entre esses rodados (Quadro 44).

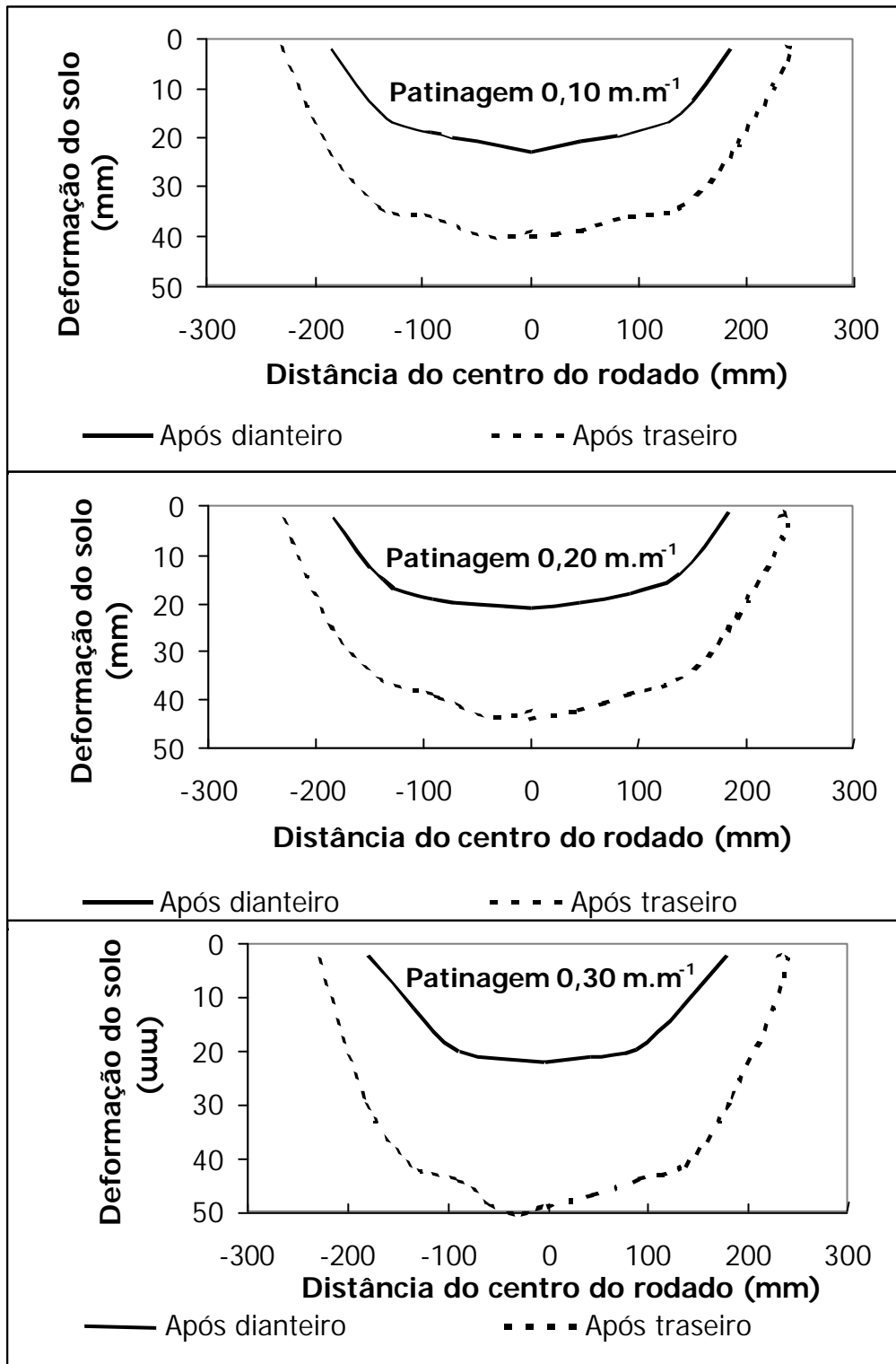


Figura 62 – Deformação do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

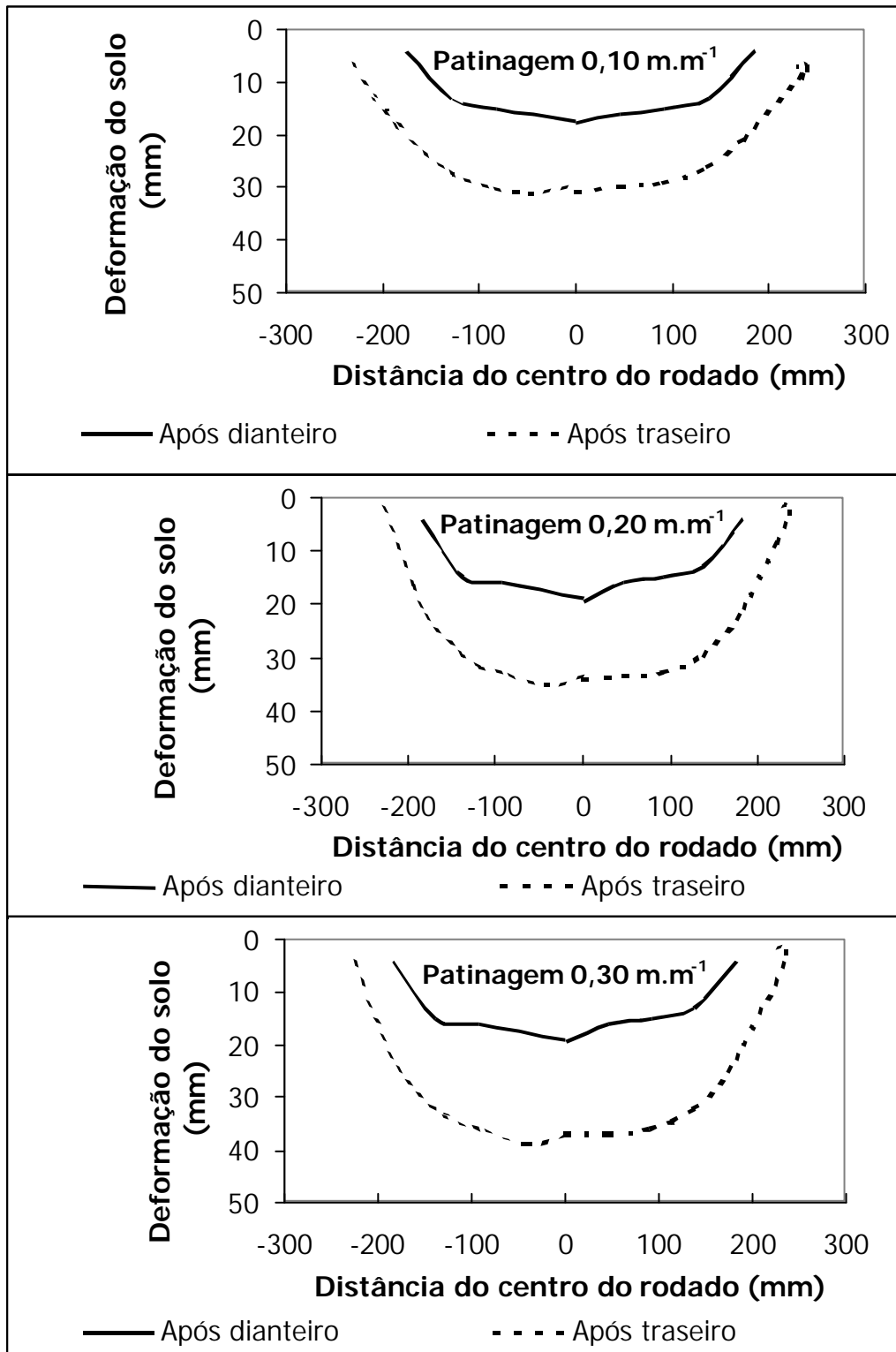


Figura 63 – Deformação do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

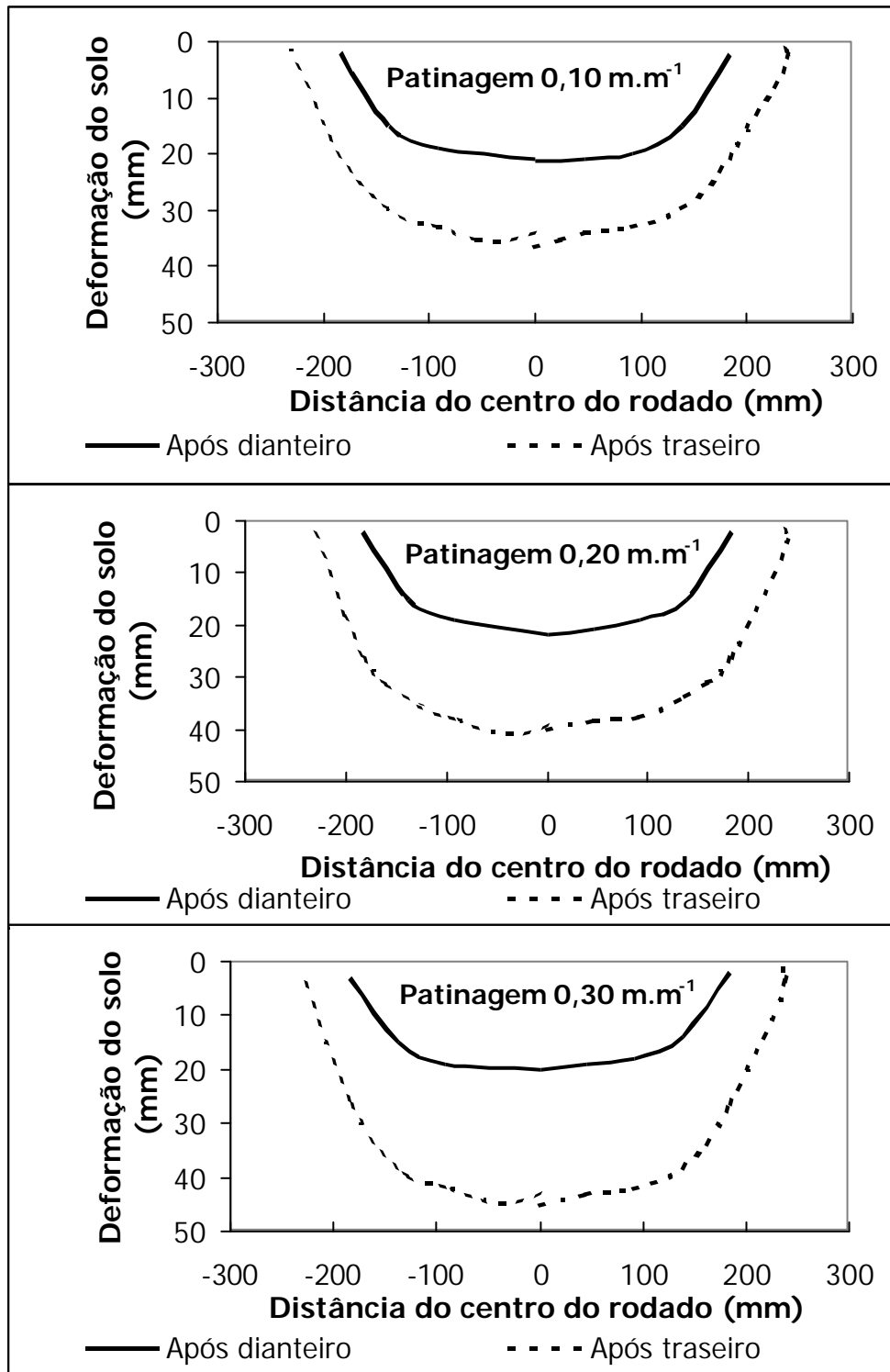


Figura 64 – Deformação do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

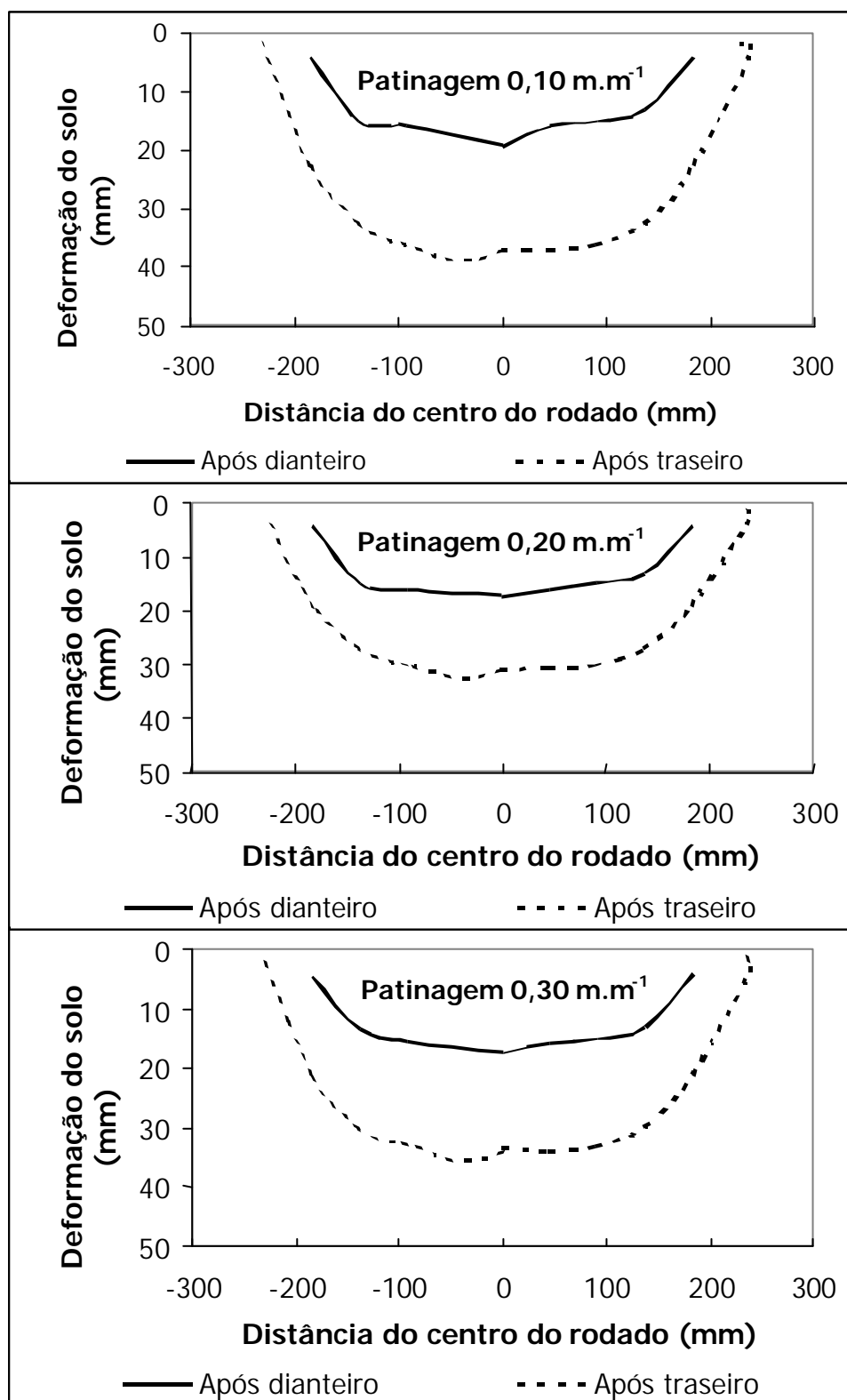


Figura 65 – Deformação do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem e patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

Quadro 44 – Deformação no centro do rodado traseiro (mm), nas diferentes condições de tipo de rodado, pressão de insuflagem e patinagem

Tipo de rodado	Pressão de insuflagem (kPa)	Deformação (mm)		
		Patinagem (m.m ⁻¹)		
		0,10	0,20	0,30
Diagonal	168	40 ^{Ba}	44 ^{Ba}	49 ^{Aa}
	98	31 ^{Ab}	34 ^{Ab}	37 ^{Ab}
Radial	168	37 ^{Ba}	40 ^{Ba}	45 ^{Aa}
	98	28 ^{Ab}	31 ^{Ab}	34 ^{Ab}

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.8.2. Teor de água no solo de 0,05 kg.kg⁻¹

Nas Figuras 66 a 69, mostra-se a deformação superficial do solo, em função do tráfego dos rodados testados, para a condição de teor de água no solo de 0,05 kg.kg⁻¹.

No Quadro 45, apresentam-se as deformações ocorridas no centro dos rodados, nas diferentes condições de pressão de insuflagem e patinagem. Observa-se, nesse quadro, que o rodado diagonal, inflado a 168 kPa, não apresentou diferença significativa ao se compararem as deformações dentro dos níveis de patinagem impostos. Ao reduzir a pressão de insuflagem para 98 kPa, observou-se que, de maneira semelhante à da condição anterior, não ocorreu diferença significativa entre deformações, nos níveis de patinagem impostos. Pela comparação entre pressões de insuflagem, dentro de cada nível de patinagem, evidenciaram-se diferenças significativas, com maiores valores atribuídos à pressão de insuflagem de 168 kPa (Quadro 45).

O rodado radial, inflado a 168 kPa, teve comportamento semelhante ao do rodado diagonal sob a mesma condição de pressão de insuflagem, ou seja, não apresentou diferença significativa entre deformações, em função da patinagem (Quadro 45). Ao reduzir a pressão de insuflagem do rodado radial para 98 kPa, observou-se comportamento semelhante ao da condição anterior, ou seja, não houve diferença significativa entre deformações, em função da

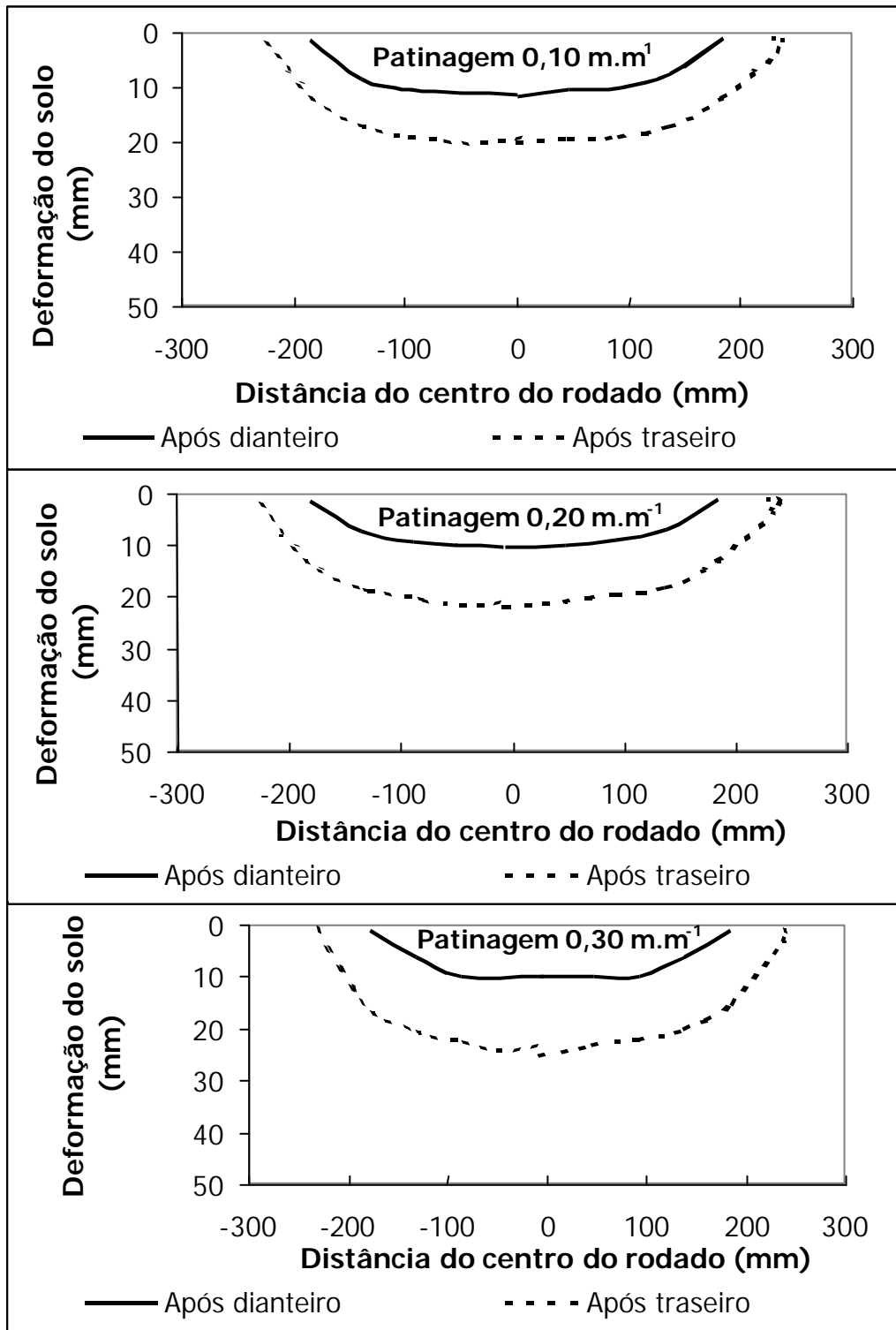


Figura 66 – Deformação do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal com 168 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

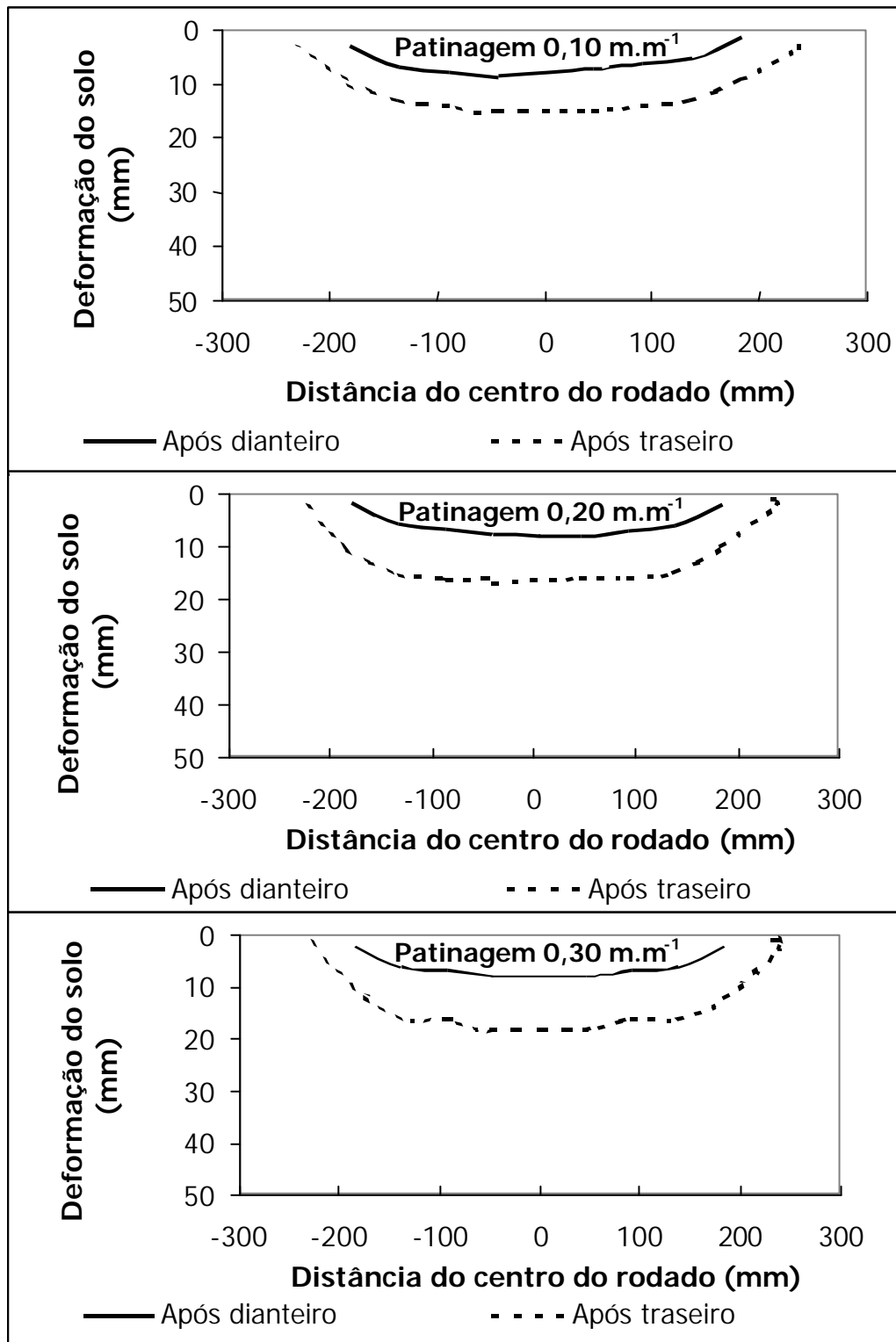


Figura 67 – Deformação do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado diagonal com 98 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

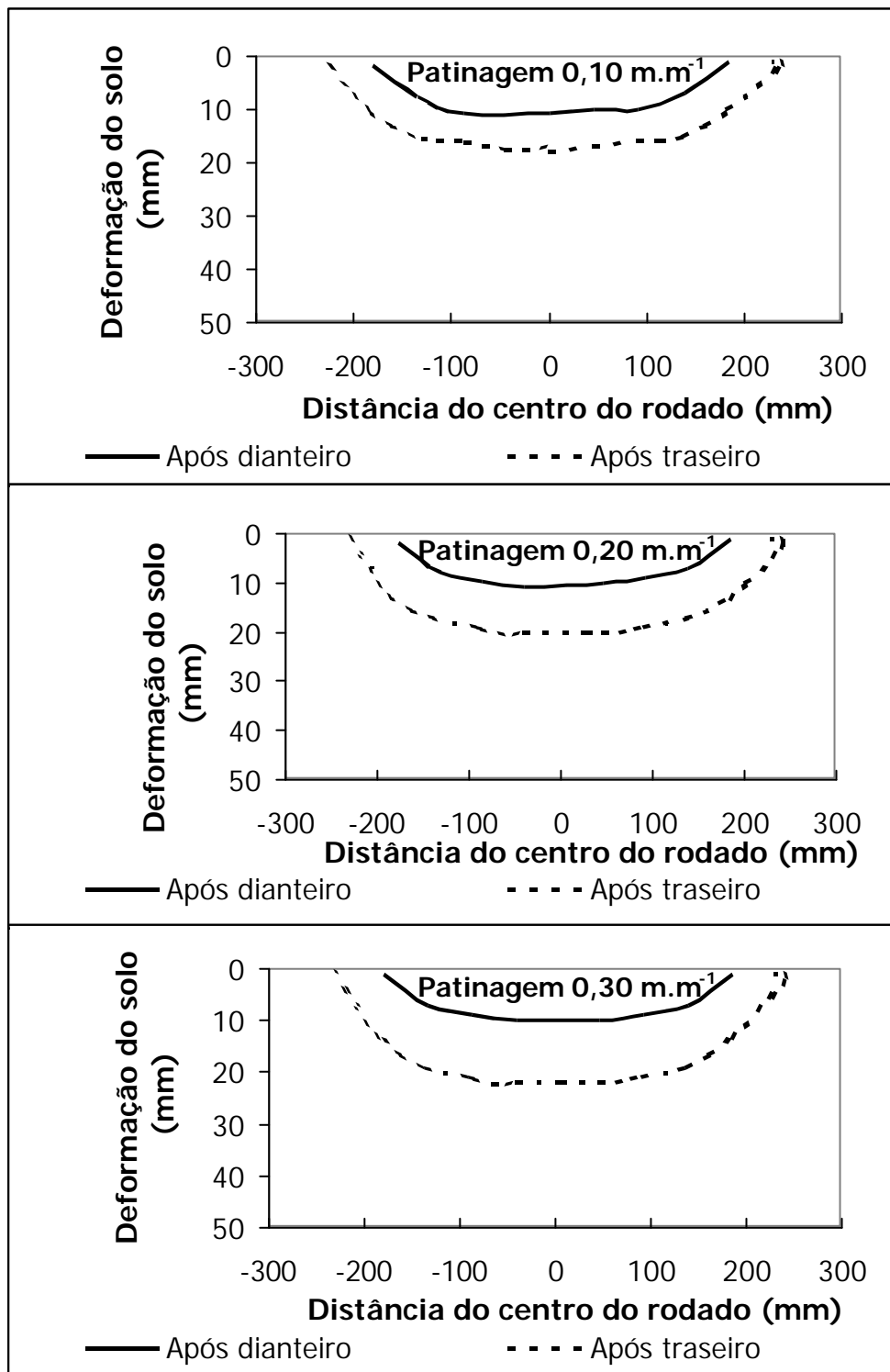


Figura 68 – Deformação do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado radial com 168 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

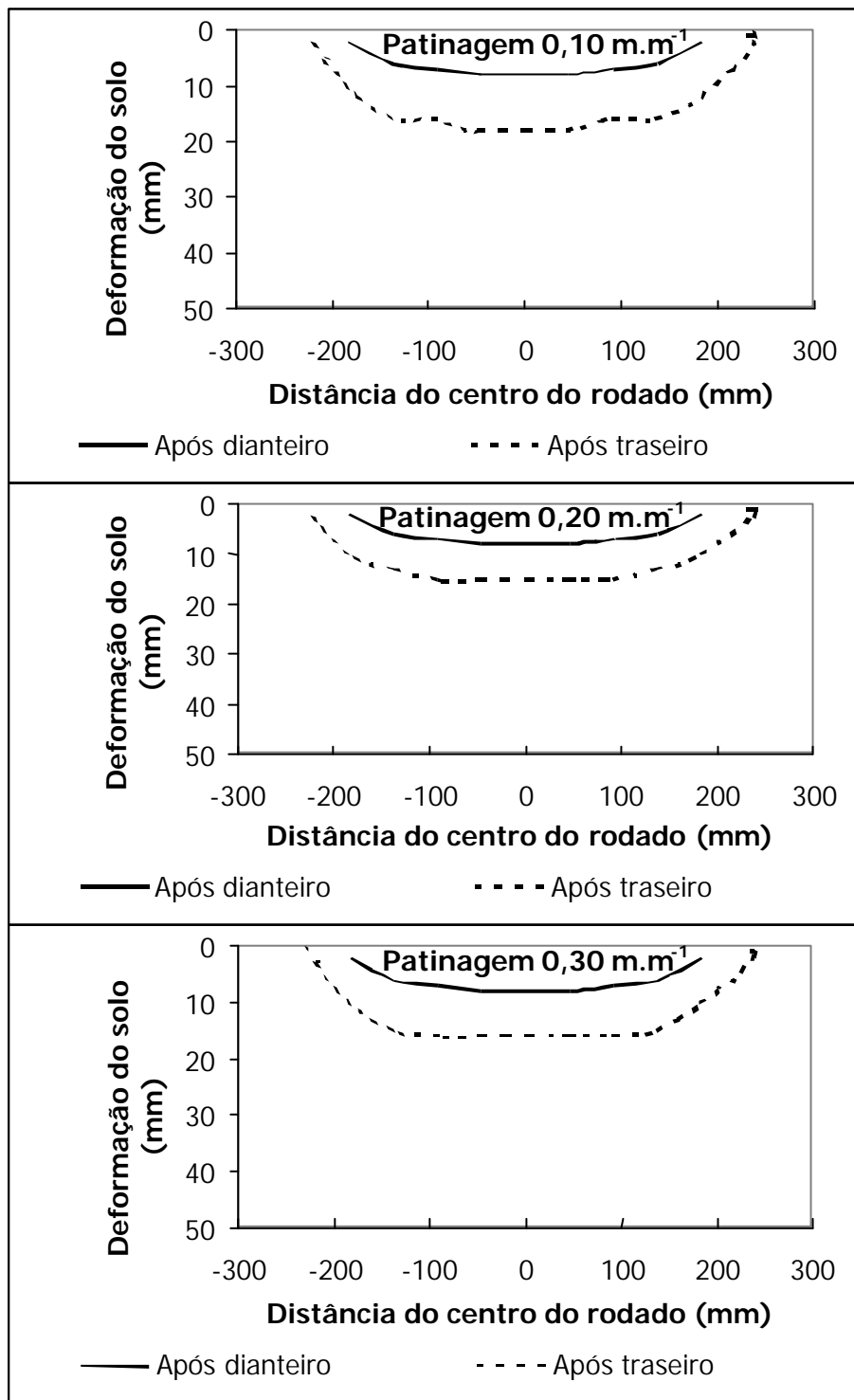


Figura 69 – Deformação do solo ao longo da largura da banda de rodagem do rodado radial com 98 kPa de pressão de insuflagem, para patinagens de 0,10, 0,20 e 0,30 m.m⁻¹.

Quadro 45 – Deformação no centro do rodado traseiro (mm), nas diferentes condições de tipo de rodado, pressão de insuflagem e patinagem

Tipo de rodado	Pressão de insuflagem (kPa)	Deformação (mm)		
		Patinagem (m.m ⁻¹)		
		0,10	0,20	0,30
Diagonal	168	20 ^{Aa}	22 ^{Aa}	25 ^{Aa}
	98	15 ^{Ab}	17 ^{Ab}	18 ^{Ab}
Radial	168	18 ^{Aa}	20 ^{Aa}	22 ^{Aa}
	98	14 ^{Ab}	15 ^{Ab}	16 ^{Ab}

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em cada linha, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

patinagem. Ao comparar o efeito da pressão de insuflagem, observou-se diferença significativa entre deformações, dentro de cada nível de patinagem, com maiores valores atribuídos à pressão de 168 kPa (Quadro 45).

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas, pôde-se concluir que:

- De forma geral, não se constatou diferença significativa ao comparar os efeitos do tipo de rodado em alterações nas propriedades mecânicas do solo estudado.
- Para a condição de teor de água no solo de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$, todas as condições de tráfego deslocaram as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo.
- Para a condição de teor de água no solo de $0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$, a pressão de insuflagem de 168 kPa teve efeito em deslocar as curvas de compressão secundárias para regiões de maiores densidades do solo, não ocorrendo o mesmo na pressão de insuflagem de 98 kPa.
- Para determinada pressão de insuflagem, a pressão de preconsolidação apresentou dependência da patinagem, com maiores valores atribuídos a maiores níveis de patinagem.
- Para determinada patinagem, a pressão de insuflagem de 168 kPa proporcionou maiores valores de pressão de preconsolidação, comparativamente à pressão de insuflagem de 98 kPa.
- As variáveis resistência à penetração, tensão cisalhante máxima e deformação superficial do solo apresentaram comportamento semelhante ao da variável pressão de preconsolidação.

- A resistência à penetração apresentou boa correlação com as variáveis pressão de preconsolidação e tensão cisalhante máxima, podendo ser utilizada para prever alterações nessas variáveis, uma vez determinada, em laboratório, a sua correlação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAM, M.; KEMPER, W. D. Infiltration of soils as affected by the pressure and water content at the time of compaction. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.43, p. 1080-1086, 1979.
- ASHBURNER, J. E.; SIMS, B. G. **Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza**. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1984. 474 p.
- BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **J. Soil Sci.**, London, v.41, p. 341-358, 1990.
- BINGNER, R. L.; WELLS, L. G. A reclamation soil compaction model: part I. Model Development. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v.35, n.2, p.405-12, 1992.
- BLOCK, W. A.; JOHNSON, C. E.; BAILEY, A. C.; BURT, E. C.; RAPER, R. L. Energy analysis of finite elements soil stress prediction. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v.37, n.6, p.1757-1762, 1994.
- CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. [S. l.]: Fundação Cargill, 1983. 44 p.
- CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. Botucatu, SP: UNESP, 2001. 155 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

- CHANCELLOR, W. J. Soil physical properties. In: UPADHYAYA, S. K.; CHANCELLOR, W.; PERUMPRAL, J. V.; SCHAFER, R. L.; GILL, W. R.; VANDENBERG, G. E. (Eds.). **Advances in soil dynamics**. St. Joseph, Mi-USA: American Society of Agricultural Engineers, 1994. Cap. 2, p. 21–244.
- DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.55-94.
- DIAS JUNIOR, M. de S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. East Lansing: Michigan State University, 1994. 114 f. (Tese de Doutorado).
- DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz–ES. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.23, n.4, p.371-380, 1999.
- DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v.20, p.175-182, 1996.
- FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n.3, p.487-493, 2000.
- GUPTA, S.C.; HADAS, A.; VOORHEES, W.B.; WOLF, D.; LARSON, W.E.; SHNEIDER, E.C. Development of quids for estimating the ease of compaction of world soils. **Research Report, Binational Agric. Res. Development**, Bet Dagan, Israel: University of Minnesota, 1985. 178 p.
- HARRIS, W. L. The soil compaction process. In: BARNES, K. K.; CARLETON, W. M.; TAYLOR, H. M.; THROCKMORTON, R. I.; VANDENBERG, G. E. (Eds.). **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph, Mi-USA: American Society of Agricultural Engineers, 1971. Cap. 2, p. 9-46.
- HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; VAN OUWRKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1994. Cap.3, p. 45-70.
- JUN, H.; KISHIMOTO, T.; WAY, T. R.; TANIGUCHI, T. Three - directional contact stress distributions for a pneumatic tractor tire in soft soil. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v.41, n.5, p.1237-1242, 1998.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência do solo à penetração sob diferentes condições de umidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras, MG: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998.

- KIRBY, J. M. Critical-state soil mechanics parameters and their variation for vertisol in eastern Australia. **J. of Soil Science**, v.42, n.3, p.487-499, 1991.
- KONDO, M. K. **Compressibilidade de três latossolos sob diferentes usos**. Lavras, MG: UFLA, 1998. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- KONDO, M. C.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n.2, p. 211-218, 1999.
- KONDO, M. C.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n.3, p. 497-506, 1999a.
- KONDO, M. C.; DIAS JUNIOR, M. S. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n.4, p. 773-782, 1999b.
- KOOLEN, A. J. Mechanics of soil compaction. In.: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1994. p. 23-45.
- KOOLEN, A. J.; KUIPERS, H. **Agricultural soil mechanics**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 241 p.
- LARSON, W. E.; ALMARAS, R. R. Management factors and natural forces as related to compaction In: BARNES, K. K.; CARLETON, W. M.; TAYLOR, H. M.; THROCKMORTON, R. I.; VANDEN BERG, G. E. (Eds.). **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph, Michigan-USA: American Society of Agricultural Engineers, 1971. 471 p.
- LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B.; GUPTA, S.C. **Mechanics and related processes in structured agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. 273 p. (NATO Applied Science, 172).
- LARSON, W. E.; GUPTA, S. Estimating critical stresses in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.44, p.1127-1132, 1980.
- LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p. 450-457, 1980.
- LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Til. Res.**, Amsterdam, v.19, p.274-286, 1991.

- MACNABB, D. H.; BOERSMA, L. Evaluation of the relationship between compressibility and shear strength of Andisol. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.57, p.923-929, 1993.
- OLIVEIRA, M. L.; BARBOSA, J. A.; SOUZA, C. M.; DIAS, G. P. Estimativa da compactação do solo pelo método da curva de compactação virgem do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. p. 4.
- RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E.; BEAULIEU, B. Clay soil compaction due to wheel slip. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v. 21, n.4, p. 646-649, 1977.
- REAVES, C. A.; NICHOLS, M. L. Surface soil reaction to pressure. **Agricultural Engineering**, v.36, p. 813-816, 820, 1955.
- REAVES, C. A.; COOPER, A. W. Stress distribution in soils under tractor loads. **Agricultural Engineering**, v.41, p. 20-21; 31, 1960.
- ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S. Avaliação da resistência ao cisalhamento de cinco solos da região de Lavras, MG. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 8, 2000, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus-BA: 2000. (CD-ROM).
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, p.239-49, 2000.
- SCHWANGHART, H. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ISTVS, 10, 1990, Kobe, Japão. **Proceedings...** Kobe, Japão: [s. n.], 1990. p.193-204.
- SHELL, L. R.; ZOZ, F.; TURNER, R. J. Field performance of rubber belt and MFWD tractors in Texas soils. **SAE Paper No. 972729**, Warrendale, PA, 1997.
- SNEDECOR, G. W.; COCHARAN. **Statistical methods**. 6. ed. Ames: Iowa University Press, 1989.
- SOANE, B. D.; BLACKWELL, P. S.; DICKSON, J. W.; PAINTER, D. J. Compaction by agricultural vehicles: a review. I. soil and wheel characteristics. **Soil & Tillage Res.**, v.1, p.207-37, 1980/1981.
- SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660 p.

- SOEHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, v. 39, p. 276-281, 1958.
- SUMALI, A.; ADAMCHUK, V. I.; MORGAN, M. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on - the - go. In: **Agricultura de precisão**. BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; MARÇAL, D.; MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALE, F. X. R.; GOMIDE, R. L. Viçosa, MG – Brasil: [s. n.], 2000. 467 p.
- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.20, p. 333-339, 1996.
- TURNER, J. L. A semiempirical model for tracked vehicles. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v.27, n.4, p.990–996, 1984.
- TURNER, R. J.; SHELL, L. R.; ZOZ, F. Field Performance of rubber belted and MFWD tractors in Southern Alberta soils. **SAE Paper No. 972730**, Warrendale, PA, 1997.
- VANDENBERG, G. E.; GILL, W. R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v.5, n.2, p.105-7, 1962.
- WAY, T. R.; BAILEY, A. C.; RAPER, R. L.; BURT, E. C. Tire lug height effects on soil stresses and bulk density. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v.38, n.3, p.669-674, 1995.
- WIERMANN, C.; WAY, T. R.; HORN, R.; BAILEY, A. C.; BURT, E. C. Effects of various dynamics loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. **Soil e Tillage Research**, v. 50, p. 127-135, 1999.
- WOOD, R. K.; BURT, E. C. Thrust and motion resistance from soil - tire stress measurements. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v.30, n.5, p.1288-1292, 1987.
- WOOD, R. K.; BURT, E. C.; JOHNSON, C. E. Dynamic load effects on thrust components along the soil-tire contact zone. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Mi-USA, v.34, n.1, p.43-6, 1991.