

TRANSBORDO DA CANA-DE-AÇÚCAR E RISCO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

**DIEGO ALEXANDER AGUILERA ESTEBAN¹, ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA²,
CÁSSIO ANTONIO TORMENA³, MOACIR TUZZIN DE MORAES⁴, MAYARA
GERMANA DOS SANTOS GOMES⁵, JEISON ANDREY SANCHEZ PARRA⁶**

¹ Doutor em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, e-mail: daaesteban@gmail.com

² Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP

³ Professor Doutor, Faculdade de Agronomia – UEM

⁴ Professor Doutor, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ESALQ/USP

⁵ Doutoranda, Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, e-mail

⁶ Doutorando, Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP

Apresentado no

LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023

18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

RESUMO: As tensões impostas pelos pneus dos transbordos utilizados na colheita mecanizada da cana-de-açúcar resultam em excessiva compactação do solo. Objetivou-se simular a distribuição de tensões aplicadas no solo e avaliar o risco de compactação imposto por quatro configurações de transbordos utilizados na colheita da cana-de-açúcar: i) 1T/21: um transbordo de 21 Mg; ii) 2T/10: dois transbordos de 10 Mg cada; iii) 1T/30: um transbordo de 30 Mg; iv) 1C/20: caminhão + um transbordo de 20 Mg. A propagação das tensões no solo foi simulada pela ferramenta TASC. Foi avaliado o risco de compactação na entrelinha por meio da comparação entre a propagação das tensões verticais no solo (σ_v) com a pressão de pré-consolidação (σ_p), e as mudanças da σ_p e da densidade do solo após o tráfego. Maiores valores de tensões máximas no solo e o maior risco de compactação foi imposto por 1C/20. As tensões transmitidas no solo por 1T/21, 2T/10 e 1T/30 não diferiram entre si. A compactação do solo aumentou na sequência 2T/10, 1T/21, 1T/30 e 1C/20. A predição do risco de compactação com uso de zonas de risco considerando a relação entre σ_v e σ_p , mostrou ser mais adequado do que o uso único do valor σ_p como limite de carga.

PALAVRAS-CHAVE: pressão de pré-consolidação, capacidade de suporte de carga do solo, pressão de inflação, carga na roda, compactação do solo.

SUGAR CANE TRANSSHIPMENT AND SOIL COMPACTION RISK

ABSTRACT: The stress imposed by the tires of the transshipments systems used in mechanized sugarcane harvesting result in excessive soil compaction. The aim was to simulate the distribution of stresses applied to the soil and evaluate the risk of soil compaction imposed by four configurations of transshipments systems used in sugarcane harvesting: i) 1T/21: one trailer - 21 Mg; ii) 2T/10: two trailers - 10 Mg each; iii) 1T/30: one trailer - 30 Mg; iv) 1C/20: truck + one trailer - 20 Mg. The propagation of stresses in the soil was simulated using the TASC tool. The risk of compaction in the interrow was evaluated by comparing the propagation of vertical stresses in the soil (σ_v) with the preconsolidation pressure (σ_p), and soil compaction was assessed based on changes in σ_p and soil density after traffic event. Higher values of maximum stresses in the soil and the greatest risk of compaction were imposed by 1C/20. The stresses transmitted in the soil by 1T/21, 2T/10, and 1T/30 did not differ from each other. Soil compaction increased in the sequence 2T/10, 1T/21, 1T/30, and 1C/20. The prediction of compaction risk using risk zones considering the relationship between σ_v and σ_p was found to be more suitable than using only the σ_p value as the load limit.

KEYWORDS: precompression stress, soil bearing capacity, inflation pressure, wheel load, soil compaction.

INTRODUÇÃO: Atualmente, cerca de 90% da colheita de cana-de-açúcar no Brasil é realizada de forma mecanizada (CONAB, 2022). No entanto, o aumento do uso de máquinas na colheita tem levado ao aumento da compactação do solo, devido ao aumento da massa das máquinas e ao tráfego intenso nas lavouras (SEVERIANO et al., 2010; SILVA et al., 2016; CAVALCANTI et al., 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019). Dentre as máquinas utilizadas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, os transbordos rebocados por tratores têm sido apontados como os principais responsáveis pela compactação do solo (LOZANO et al., 2013; SILVA et al., 2016; GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019; JIMENEZ et al., 2021). No entanto, nos últimos anos, caminhões autônomos têm sido utilizados como alternativa, visando reduzir os custos operacionais, aumentar o rendimento e melhorar a precisão e agilidade nas operações.

Modelos pseudo-analíticos têm sido utilizados para prever o comportamento do solo e as tensões impostas pelo tráfego das máquinas (ARAUJO JUNIOR et al., 2011; LOZANO et al., 2013; SCHJØNNING e LAMANDÉ, 2018; GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019), permitindo o desenvolvimento de estratégias de manejo para minimizar o risco de compactação do solo. Esses modelos consideram o solo como homogêneo, isotrópico e elástico, e permitem simular a distribuição de tensões e estimar o risco de compactação do solo (KELLER et al., 2007; LOZANO et al., 2013), com base na comparação entre as tensões verticais transmitidas no solo (σ_z) e a capacidade do solo de resistir à compactação como a pressão de pré-consolidação (σ_p) (STETTLER et al., 2014; SCHJØNNING e LAMANDÉ, 2018). Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi simular a distribuição de tensões aplicadas no solo por diferentes transbordos utilizados na colheita da cana-de-açúcar e avaliar o risco de compactação em um Latossolo Vermelho Distrófico no Sudeste do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS: O experimento foi conduzido em área comercial no município de Frutal (MG – Brasil) (19°56'41" S e 49°07'30" W, altitude de 520 m, precipitação média anual de 1.373 mm e temperatura média de 24,7 °C). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (SANTOS et al., 2018) de textura média-argilosa nos primeiros 0,70 m de profundidade, com teor de argila entre 286 e 314 g kg⁻¹, densidade de partículas entre 2,56 e 2,58 Mg m⁻³, limite de contração entre 0,11 e 0,13 kg kg⁻¹). Anterior à implantação do experimento a área tinha sido cultivada com cana-de-açúcar durante 2 ciclos de cultivo de 5 cortes cada. Após a reforma do canavial (eliminação mecânica da soqueira, subsolagem e gradagem), em julho de 2019 foi feito o plantio manual da cana-de-açúcar (variedade CTC 9002, 0,30 m de profundidade do sulco, 15 gemas m⁻¹ e 1,5 m de espaçamento entre linhas de plantio). O experimento foi implantado em delineamento de blocos casualizados (4 tratamentos, 3 blocos, 12 parcelas experimentais de 100 m de comprimento x 15 m de largura), com tratamentos correspondentes às configurações de transbordo (Tabela 1).

Em junho de 2020, antes da primeira colheita da cana-de-açúcar (cana planta), foram coletadas amostras indeformadas de solo (6,0 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura) no centro das camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,50 e 0,50-0,70 m no local da entrelinha (EL), para geração do modelo de capacidade de suporte de carga do solo. Em agosto de 2020 foi feita a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, com uso de uma colhedora John Deere - CH 570 (massa = 20,85 Mg; bitola = 1,88 m; largura da esteira = 0,44 m; carga aplicada / esteira = 102 kN, pressão média de contato = 78 kPa). O transbordo da cana-de-açúcar foi realizado conforme os tratamentos descritos na Tabela 1, todas as máquinas com largura de bitola de 3 m e com auxílio de sistema de piloto automático para garantir o controle de tráfego. Antes da operação de colheita, foi mensurada a resistência do solo à penetração

por meio de um penetrômetro de impacto (STOLF et al., 2014) com valores entre 0,84 e 1,20 MPa e teor de água entre 0,09 e 0,12 kg kg⁻¹ na camada de 0,0-0,10 m. Após a primeira colheita da cultura, novas amostras de solo foram coletadas nas mesmas camadas de solo para determinação da pressão de pré-consolidação (σ_p) e da densidade do solo (Ds).

TABELA 1. Especificações dos tratamentos usando diferentes configurações de transbordo

Tratamento	1T/21		2T/10*		1T/30		1C/20			
Máquina	Trator		Transbordo × 1	Transbordo × 2	Trator		Transbordo × 1	Caminhão		Transbordo × 1
Marca	CASE IH		TMA	SANTAL	CASE IH		TMA	Mercedes Benz		Grunner
Modelo	Puma 185		VTX 5022	VT 10	Puma 230		VTX 6030	AXOR 3131		ATR 320X
CM (Mg)	-		21	10	-		30			20
Eixo	1 (D)	2 (T)	4 ⁺ (Q)	2 ⁺ (Tm)	1 (D)	2 (T)	5 ⁺ (Pn)	1 (D)	2 (D)	3 e 4 (T)
CR (kN)	20,40	26,38	46,34	43,84	23,09	28,83	49,40	30,69	46,09	52,61
Pneu	18.4-26	24.5-32	600/50-22.5	600/50-22.5	600/65R28	710/70R38	600/50-22.5	400/70R20		560/60R22.5
PI (kPa)	159	145	345	345	172	158	345	414		414
AC** (m ²)	0,218	0,318	0,290	0,273	0,251	0,353	0,318	0,207	0,297	0,153
σ_m ** (kPa)	94	83	160	161	92	82	159	148	155	343
$\sigma_{z,máx}$ ** (kPa)	162	144	277	279	159	142	275	256	269	595

* Transbordo rebocado pelo mesmo trator usado em 1T/21; CM: Capacidade máxima de carga; CR: Carga na roda; PI: pressão de inflação dos pneus nas condições de operação das máquinas em campo; AC: área de contato pneu-solo; σ_m : pressão média de contato pneu-solo; $\sigma_{z,máx}$: tensão vertical máxima; ** Preditas na ferramenta TASC. + Indica o número de eixos; D = dianteiro; T = traseiro; Q: quadrem; Tm; tandem; Pn: penta.

Para a geração dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, a pressão de pré-consolidação foi determinada pelo ensaio de compressão uniaxial utilizando um consolidômetro automatizado CNTA-IHM/BR-001/07 (SILVA et al., 2015). No laboratório, após saturação, as amostras indeformadas de solo foram equilibradas nos potenciais matriciais de -2, -6 e -10 kPa (mesa de tensão) e, -100 e -500 kPa (câmaras de pressão de Richards com placa porosa) e submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com incrementos sucessivos de carga de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa (Bowles, 1986). Cada pressão foi aplicada até atingir 90% da deformação máxima (Taylor, 1971), seguida pela aplicação da próxima carga crescente, para a obtenção da curva de compressão do solo [Ds vs log (σ)] (SILVA et al., 2015). Após o ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, por 48 horas para determinação da Ds e dos teores de água da amostra em cada potencial matricial. A partir da curva de compressão foi obtido o valor da σ_p conforme Dias Júnior e Pierce (1995). O modelo de capacidade de suporte de carga do solo foi obtido ajustando σ_p (kPa) à densidade do solo (Ds, Mg m⁻³) e teor de água (U, kg kg⁻¹) usando um modelo não linear adaptado de Busscher (1990) [$\sigma_p = a \cdot Ds^b \cdot U^c$] onde a, b e c são parâmetros de ajuste do modelo.

A partir das características das máquinas foram obtidas as áreas de contato pneu-solo (AC), a pressão média de contato pneu-solo (σ_m) e a estimativa e propagação das tensões no solo impostas pelas cargas estáticas das máquinas utilizando a planilha Tyres/Tracks and Soil Compaction – TASC V3.0 (DISERENS et al., 2014). A propagação das tensões no solo foi calculada utilizando a categorias de rigidez do solo na camada superficial como sendo solo solto a partir dos valores de resistência do solo à penetração (DISERENS et al., 2014). O risco de compactação do solo foi avaliado com base em dois critérios: 1) uso de σ_p como limite crítico de carga (ARAÚJO JUNIOR et al., 2011; DISERENS et al., 2014; GUIMARÃES JÚNNYOR et al., 2019), no qual existe risco de compactação do solo se a tensão vertical (σ_z) na profundidade analisada for maior que o valor de σ_p ; 2) uso de zonas de risco de compactação em função da relação entre σ_z e σ_p : não há risco de compactação quando $\sigma_z < 0,5\sigma_p$; há considerável risco de compactação quando $0,5 \sigma_p < \sigma_z < 1,1 \sigma_p$; risco de

compactação crítica quando $\sigma_z > 1,1 \sigma_p$ (STETTLER et al., 2014). A simulação do risco à compactação foi realizada para as máquinas nas configurações de operação utilizadas na usina, para o teor de água do solo no momento da operação de colheita. O efeito do tráfego das máquinas na compactação do solo foi avaliado pela mudança nos valores de σ_p e D_s depois da colheita da cana-de-açúcar.

O modelo de capacidade de suporte de carga do solo foi ajustado aos dados medidos usando a rotina "PROC NLIN" seguindo o método Gauss-Newton do Statistical Analysis System 8.0 (SAS 8.0), e o gráfico foi plotado através do programa Sigma Plot 14.0 (Systat Software Inc®). Os valores de propagação das tensões no perfil do solo assim como os valores de propagação das tensões verticais sob o centro do pneu obtidos na planilha TASC e da pressão de pré-consolidação nas diferentes profundidades, foram plotados também no software Sigma Plot 14.0 (Systat Software Inc®).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: O modelo de capacidade de suporte de carga do solo explicou o 97% da variabilidade da σ_p e foi significativo ($p < 0,01$) (Figura 1), indicando que o modelo de Busscher (1990) é adequado para estimar σ_p a partir da densidade do solo (D_s) e teor de água do solo (U). Além disso, os parâmetros do modelo ($b = 2,096$ e $c = -1,506$) foram significativos, sugerindo que o efeito da D_s e do U foram capturados no modelo para estimar a capacidade de suporte de carga do solo.

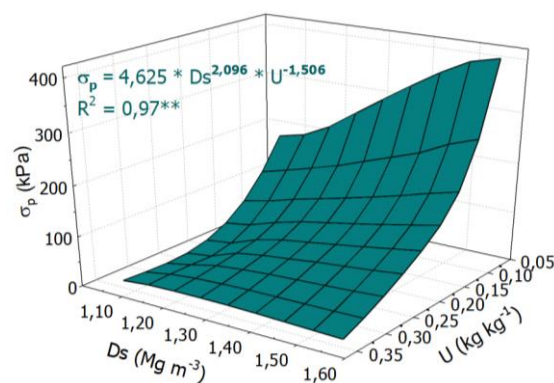


FIGURA 1. Estimativa da pressão de pré-consolidação (σ_p) utilizando o modelo de capacidade de suporte de carga do solo em função da densidade do solo (D_s) e do teor de água no solo (U) para as condições do solo antes da operação de colheita da cana-de-açúcar.

Das máquinas utilizadas no transbordo da cana-de-açúcar, os pneus dos eixos 3 e 4 da configuração de transbordo 1C/20 apresentou a menor área de contato pneu-solo (AC) (Tabela 1) e dentre as configurações de transbordos rebocados por trator, os pneus dos eixos 1 (dianteiro) e 2 (traseiro) dos tratores apresentaram, respectivamente, os menores e maiores valores de AC. Esses resultados são devidos aos efeitos combinados da dimensão do pneu, carga e pressão de inflação, assim como a rigidez e a área de contato específica (relação entre área de contato e o volume do pneu) (DISERENS, 2009; DISERENS e ALAOU, 2011). Os elevados valores de carga na roda (CR) e baixos valores de AC nos pneus traseiros (eixos 3 e 4) do caminhão transbordo - 1C/21, resultaram nos maiores valores de σ_m entre os transbordos avaliados (Tabela 1). Comportamento oposto foi obtido nos pneus traseiros dos tratores, resultando nos menores valores de AC. Os pneus dos transbordos utilizados em 1T/21, 2T/10 e 1T/30 apresentam valores de σ_m similares de 160, 161 e 159 kPa, respectivamente. Estes resultados indicam incrementos de 114% na σ_m nos pneus traseiros do caminhão transbordo com relação aos pneus dos transbordos rebocados por trator e de 265 e 313% comparado aos pneus dos tratores que rebocam os transbordos.

Os máximos valores das tensões no solo ($\sigma_{z,m\acute{a}x}$) impostas pelos pneus das máquinas foram obtidas na superfície do solo e no centro dos pneus traseiros (eixos 3 e 4) do caminhão transbordo - 1C/20 (595 kPa) (Tabela 1). As tensões sob os pneus dianteiros e traseiros dos tratores são quase idênticas, bem como as tensões sob os pneus dos transbordos 1T/21, 2T/10 e 1T/30 (275-277 kPa) (Figura 2a, 2b e 2c). Contudo, os menores valores de $\sigma_{z,m\acute{a}x}$ foram obtidas nos pneus do eixo 2 (traseiro) dos tratores (Tabela 1 e Figura 2).

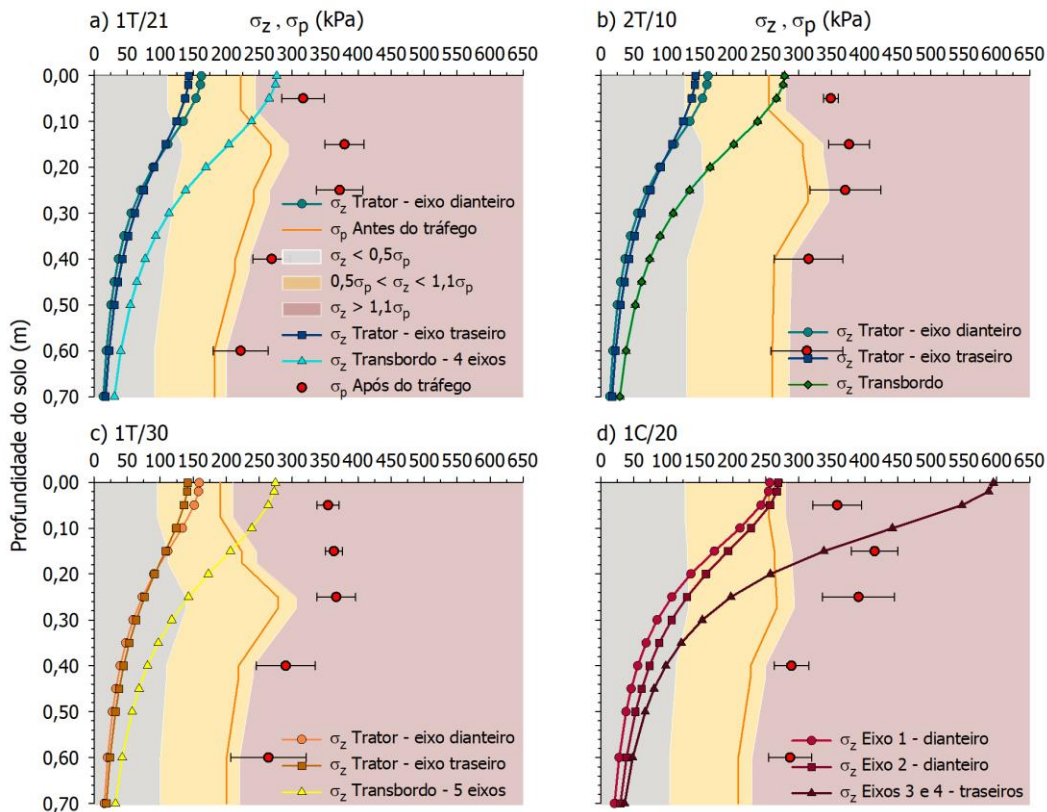


FIGURA 2. Tensões verticais no solo (σ_z) simuladas sob o centro dos pneus das máquinas utilizadas no transbordo da cana-de-açúcar, pressão de pré-consolidação do solo (σ_p) antes e depois do tráfego e critérios usados para avaliação do risco de compactação: σ_p como ponto de estabilidade e zonas de risco de compactação em função da relação entre σ_z e σ_p ($\sigma_z < 0,5\sigma_p$ = não há risco de compactação; $0,5\sigma_p < \sigma_z < 1,1\sigma_p$ = há considerável risco de compactação; $\sigma_z > 1,1\sigma_p$ = compactação é esperada).

Embora não foram encontrados na literatura estudos avaliando a distribuição das tensões no solo impostas pelo caminhão utilizado no transbordo 1C/20, os resultados podem ser comparáveis com os obtidos por Lozano et al. (2013) ao simular as tensões transmitidas no solo pelos pneus duplos de um reboque tracionado por trator (pneus 10,00-20 146/63, CR = 24,52 kN e PI = 724 kPa). Neste estudo, o valor da $\sigma_{z,m\acute{a}x}$ foi de 870 kPa e a σ_m de 542 kPa para simulações feitas em condição do solo antes da primeira colheita da cana-de-açúcar. Os resultados obtidos para os transbordos 1T/21, 2T/10 e 1T/30 são semelhantes aos obtidos por Guimarães Júnnyor et al. (2019) que utilizou a ferramenta TASC. Os autores verificaram que os maiores valores $\sigma_{z,m\acute{a}x}$ (272 kPa) foram transmitidas pelos pneus (600/50-22.5) do transbordo ATA 10500 (CR = 43,74 kN e PI = 330 kPa) e os menores valores (157 e 130 kPa) foram transmitidos pelos pneus dianteiros e traseiros (18.4-26 e 24.5-32) do trator Valtra BH 180 (CR = 29,61 e 28,93 kN, PI = 160 e 80 kPa). As σ_z nas camadas superficiais sob os pneus dos tratores e dos transbordos (1T/21, T/10 e 1T/30) apresentaram um comportamento

relacionado com a pressão de inflação (PI). Sob esses pneus a $\sigma_{z.m\acute{a}x}$ aumentou linearmente com a PI ($\sigma_{z.m\acute{a}x} = 45,46 + 0,67PI$, $R^2 = 0,99$, $p < 0,001$), pois os valores de PI estavam próximos das pressões de inflação recomendadas. A tensão máxima na área de contato pneu-solo está altamente correlacionada com a PI dos pneus e em maiores profundidades a influência da PI na magnitude das tensões é menor, passando então a ter maior incidência a carga na roda (SCHJØNNING et al., 2012; SCHJØNNING et al., 2016). Contudo, para o caminhão transbordo – 1C/20, os valores de σ_z próximo da superfície do solo foram menores e maiores do que os valores de PI nos pneus dos eixos 1 - 2 e 3 - 4, respectivamente, devido a PI ser a mesma em todos os pneus sem considerar as cargas nas rodas.

Considerando primeiramente o valor da σ_p como limite crítico de carga, obtido para cada profundidade a partir dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo e com o teor de água do solo durante a operação de colheita, os resultados da simulação do risco de compactação do solo indicam que todos os pneus do caminhão transbordo (1C/20), induziram a risco de compactação, atingindo até a profundidade de 0,20 m nos pneus traseiros (eixos 3 e 4) ao impor as maiores σ_z no solo e com valores superiores à σ_p (Figura 2d). Os sistemas de transbordo 1T/21, 2T/10 e 1T/30 apresentaram risco de compactação pelos rodados dos transbordos até as profundidades de 0,10, 0,08 e 0,15 m (Figura 2a, 2b e 2c). Contudo, os tratores utilizados para rebocar os transbordos aplicaram cargas que foram insuficientes para caracterizar risco de compactação do solo nas condições deste experimento.

Apesar das σ_z no solo terem sido similares sob os pneus dos tratores, a partir da profundidade de 0,18 m, os valores de σ_z são ligeiramente maiores sob o eixo 1 (traseiro) do que no eixo 2 (dianteiro). Esse comportamento é devido à influência da maior CR nos pneus do eixo 2, uma vez que em profundidade, as tensões verticais no solo estão diretamente relacionadas com a CR (LAMANDÉ e SCHJØNNING, 2011; SCHJØNNING et al., 2016). As maiores σ_z em profundidade obtidas nos pneus dos eixos 3 e 4 em 1C/20, devem-se, portanto, ao efeito combinado da CR e AC explicados anteriormente (HORN e PETH, 2011; LAMANDÉ e SCHJØNNING, 2011; SCHJØNNING et al., 2016), pois esses pneus apresentaram, respectivamente, o maior e o menor valor desses parâmetros.

Segundo o critério de zonas de risco de compactação em função da relação entre σ_z e σ_p no modelo, é esperado que aconteça compactação por todos os pneus no tratamento 1C/20, alcançando profundidade de 0,18 m nos eixos 3 e 4 bem como havendo considerável risco de ocorrer compactação na profundidade de 0,18-0,36 m (Figura 2d). Compactação do solo também é esperada sob os pneus dos transbordos 1T/21 e 1T/30 na profundidade 0,08 e 0,11 m bem como há considerável risco de ocorrer compactação até profundidades de 0,28, 0,22 e 0,25 m, em 1T/21, 2T/10 e 1T/30, respectivamente (Figuras 2a, 2b e 2c). Embora não seja esperada compactação pelos pneus dos tratores que rebocam os transbordos, risco considerável é imposto pelo trator do transbordo 1T/30 na profundidade de 0,15 m.

Os valores de σ_p obtidos nos teores de água do solo por ocasião do tráfego das máquinas, apresentaram incremento quando comparados com a σ_p antes do tráfego em todos os tratamentos (Figura 2). O incremento da σ_p após o tráfego das máquinas ocorreu nas primeiras quatro camadas para 1T/21 e 1T/30, nas primeiras duas camadas em 2T/10 e em todas as camadas para 1C/20, sugerindo assim a ocorrência de compactação. Esse resultado era esperado, pois risco de compactação nessa camada tinha sido previsto nas simulações, como consequência de as tensões máximas impostas no solo pelos pneus das máquinas serem maiores do que σ_p . Embora o uso da pressão da pré-consolidação como referência crítica na simulação do risco à compactação somente tenha acusado risco de compactação na profundidade nas primeiras duas camadas para 1T/21, 1T/30 e 1C/20, e na primeira camada para 2T/10, o uso das zonas de risco de compactação definidas em função da relação σ_z / σ_p demonstram considerável risco de compactação em camadas mais profundas. Os resultados de Keller et al. (2012) reportaram a ocorrência de deformação permanente significativa do

subsolo quando a tensão vertical excedeu 0,5 vezes a pressão de pré-consolidação, o que pode explicar a ocorrência de compactação em profundidade.

A comparação entre os valores de densidade do solo (D_s) antes e depois da passagem das máquinas (Figura 3) indicam também que houve incremento na D_s e, portanto, compactação do solo, como tinha sido verificado pelo incremento da σ_p . Na camada de 0,0-0,10 m a D_s aumentou significativamente em todos os tratamentos. Na camada de 0,10-0,20 m o incremento na D_s foi significativo em 1T/21, 2T/10 e 1C/20, enquanto nas três camadas restantes o tratamento 1C/20 apresentou o maior incremento de D_s na entrelinha.

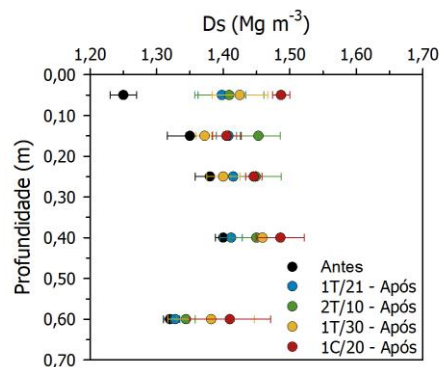


FIGURA 3. Densidade do solo antes e depois do tráfego das máquinas utilizadas no transbordo da cana-de-açúcar. Médias são consideradas iguais quando há sobreposição das barras de erro.

As operações de colheita e transbordo neste estudo foram conduzidas em condições práticas de realização da colheita da cana-de-açúcar em boa parte da região Sudeste do Brasil. Nesse sentido, na época em que essas operações foram realizadas o solo estava relativamente seco, com teor de água ($0,09$ e $0,12\ kg\ kg^{-1}$) próximo do limite de contração do solo ($0,11$ e $0,13\ kg\ kg^{-1}$). Assim, os resultados mostraram, que mesmo nestas condições, a operação de transbordo da cana-de-açúcar, independente do sistema utilizado, resulta em compactação do solo, corroborando o alerta previamente feito por Severiano et al. (2010). Os resultados indicam que a compactação do solo foi constatada e aumentou na sequência 2T/10, 1T/21, 1T/30 e 1C/20. Ressalta-se que não pode atribuir o aumento da σ_p unicamente à compactação do solo causada pelas máquinas, pois a magnitude da pressão de pré-consolidação pode ser alterada devido às forças internas que atuam no solo durante a contração e expansão advindas dos ciclos de umedecimento e secagem do solo (SOMAVILLA et al., 2021).

Embora o uso da σ_p como limite de aplicação de carga para simular o risco à compactação seja amplamente utilizado, os resultados da σ_p após o evento de colheita, evidenciaram compactação do solo em tratamentos ou profundidades nos quais esse critério não acusou risco de compactação, mostrando que pode ser mais apropriado o uso de intervalos de risco em função da relação σ_z / σ_p , em vez de um limite fixo de tensão mecânica para o carregamento sustentável do solo, conforme destacado por Schjønnning et al. (2023). Como apontado por Lima et al. (2021), o uso de zonas de risco de compactação, pode reduzir a possibilidade de erros de predição, relacionados, entre outros, ao método usado para determinação da σ_p (KELLER et al., 2004), às deformações residuais (KELLER et al., 2012) e à estimativa das tensões no solo, podendo não representar adequadamente o comportamento mecânico do solo sob condições de campo.

Valores de σ_p , indicando a ocorrência de compactação, mesmo quando os resultados das simulações não alertaram sobre o risco à compactação, podem ser explicados também pelo efeito das múltiplas passadas ou cargas repetidas causadas pelos pneus da mesma máquina ou pelo conjunto de máquinas (trator + transbordo) e pelos efeitos do cisalhamento advindo das

cargas dinâmicas devidas à força de tração necessária para rebocar os transbordos (DAMME et al., 2021). Seehusen et al. (2019) destacaram que a passagem repetida com uma pequena carga na roda pode ser mais prejudicial do que uma única passagem com uma maior carga na roda e que a passagem do primeiro rodado causa o maior estresse no solo, apesar de que cada roda subsequente causa estresse adicional. Outros resultados também têm demonstrado que o número de passagens dos pneus aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração (BOTTA et al., 2009; NADERI-BOLDAJI et al., 2018).

O efeito de múltiplas passadas de máquinas na compactação do solo pode ser determinante em regiões canavieiras com colheita mecanizada. Atualmente, as configurações das máquinas utilizadas na colheita da cana duplicam o tráfego nas entrelinhas para cada linha de cana colhida (MAGALHÃES e BRAUNBECK, 2014). O uso de transbordos rebocados por trator aumenta o número de eixos em função da maior capacidade de carregamento do transbordo, aumentando a frequência com que ocorre a repetição do tráfego na entrelinha da cultura. Esse fato fica claro nos sistemas de transbordo avaliados nesta pesquisa, em que o número de rodados que trafega na entrelinha foi de 6 (1T/21 e 2T/10), 7 (1T/30) e 4 (1C/20). Nesse sentido, destaca-se a necessidade de realização de mais pesquisas em campo para quantificar o efeito destas altas intensidades de tráfego advindas das configurações das máquinas com diferentes números de eixos na distribuição de tensões e no comportamento compressivo do solo.

CONCLUSÕES: Nas condições em que o experimento foi conduzido, todos os sistemas de transbordo utilizados na colheita da cana-de-açúcar promoveram compactação no solo, mesmo quando o tráfego ocorreu com teor de água no solo próximo do limite de contração. O maior risco de compactação na entrelinha foi imposto pelos pneus traseiros (eixos 3 e 4) do transbordo composto por caminhão (1C/20). Nos sistemas de transbordo rebocados por tratores as tensões transmitidas no solo pelos pneus dos transbordos foram similares, impondo similar risco de compactação. A pressão de pré-consolidação como limite de aplicação de cargas no solo permitiu comprovar que os transbordos 2T/10, 1T/21, 1T/30 e 1C/20 apresentaram entre 40 e 70% das amostras de solo coletadas após a primeira colheita, indicando ocorrência de compactação do solo. A predição do risco de compactação mediante uso de zonas de risco considerando a relação entre as tensões no solo e a pressão de pré-consolidação, mostrou ser mais adequado do que o uso único do valor pressão de pré-consolidação como limite de carga a ser aplicada no solo, alertando sobre a ocorrência e o considerável risco de compactação.

AGRADECIMENTOS: À Usina Cerradão pela disponibilização da área experimental e pelo apoio logístico para condução da pesquisa. Esta pesquisa foi financiada pela Fundação AGRISUS - Agricultura Sustentável (processo No PA 3054/21) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo nº 2021/09077-2). O primeiro autor agradece ao “Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia – MINCIENCIAS” pelo financiamento do doutorado no período 05/2020 - 02/2023 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa no primeiro ano do doutorado: O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bolsa processo nº 140955/2019-4.

REFERÊNCIAS:

ARAUJO JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCANTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.115-131, 2011.

BOTTA, G.F.; BECERRA, A.T.; TOURN, F.B. Effect of the number of tractor passes on soil

rut depth and compaction in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, v.103, n.2, p.381-386, 2009.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. Transactions of the ASAE, v.33, p.0519–0524, 1990.

CAVALCANTI, R.Q.; ROLIM, M.M.; LIMA, R.P.; TAVARES, U.E.; PEDROSA, E.M.R.; GOMES, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.189, p.140-147, 2019.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. Cana-de-açúcar - Safra 2022/23, v.9 - Terceiro levantamento, n.3, Brasília, p.1-58, 2022.

DAMME, L.; SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM, L.J.; GREEN, O.; NIELSEN, S.K.; LAMANDÉ, M. Soil structure response to field traffic: Effects of traction and repeated wheeling. **Soil and Tillage Research**, v.213, e105128, 2021.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curve. **Soil Technology**, v.8, n.2, p.139-151, 1995.

DISERENS, E. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. **Soil and Tillage Research**, v.103, n.2, p.302-209, 2009.

DISERENS, E.; ALAOUI, A. **Contact area of agricultural tyres, Estimation**. In: Jan GLIŃSKI, J.; HORABIK, J.; LIPIEC, J. (Eds.). Encyclopedia of Agrophysics, Springer, p.148-153, 2011.

DISERENS, E.; BATTIATO, A.; SARTORI, L. **Soil compaction, Soil Shearing and Fuel Consumption: TASC V3.0—A Practical Tool for Decision-Making in Farming**. In: International Conference of Agricultural Engineering, 39, Zürich, Switzerland, p.6-10, 2014.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W.S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I.C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C.V.V.; SOUZA, Z.M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the Total Environment**, v.681, p.424-434, 2019.

HORN, R.; PETH, S. **Mechanics of Unsaturated Soils for Agricultural Applications**. In: HUANG, P.M.; LI, Y.; SUMMER, M.E. (Eds.). Handbook of Soil Sciences Properties and Processes. CRC Press, p.3-30, 2011.

JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M.M.; GOMES, I. F.; LIMA, R.P.; BERRÍO, L.L. A.; ORTIZ., P.F.S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 206, e104847, 2021.

KELLER, T.; DÉFOSSEZ, P.; WEISSKOPF, P.; ARVIDSSON, J.; RICHARD, G. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil and Tillage Research**, v.93, n.2, p.391-411. 2007.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J.; SCHJØNNING, P.; LAMANDÉ, M.; STETTLER, M.; WEISSKOPF, P. In situ subsoil stress-strain behavior in relation to soil precompression stress. **Soil Science**, v.177, n.8, p.490-497, 2012.

LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II. Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. **Soil and Tillage Research**, v.114, n.2, p.71-77, 2011.

LIMA, R.P.; SILVA, A.R.; SILVA, A.P. Soilphysics: An R package for simulation of soil compaction induced by agricultural field traffic. **Soil and Tillage Research**, v.206, e104824, 2021.

- LOZANO, N.; ROLIM, M.M.; OLIVEIRA, V.S.; TAVARES, U.E.; PEDROSA, E.M.R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.129, p.61-68, 2013.
- MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. **Sugarcane and straw harvesting for ethanol production**. In: CORTEZ L. A.B. (Coord.). Sugarcane bioethanol - R&D for productivity and sustainability. São Paulo: Editora Edgard Blücher, p.465-476, 2014.
- NADERI-BOLDAJI, M.; KAZEMZADEH, A.; HEMMAT, A.; ROSTAMI, S.; KELLER, T. Changes in soil stress during repeated wheeling: A comparison of measured and simulated values. **Soil Research**, v.56, p.204-214, 2018.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2018.
- SCHJØNNING, P.; LAMANDÉ, M.; KELLER, T.; STETTLER, M. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. **Soil Use and Management**, Hoboken, v.28, n.3, p.378-393, 2012.
- SCHJØNNING, P.; LAMANDÉ, M.; MUNKHOLM, L.J.; LYNGVIG, H.S.; NIELSEN, J.A. Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently - trafficked, temperate-region sandy loam soils. **Soil and Tillage Research**, v.163, p.298-308, 2016.
- SCHJØNNING, P.; LAMANDÉ, M. Models for prediction of soil precompression stress from readily available soil properties. **Geoderma**, v.320, p.115-125, 2018.
- SCHJØNNING, P.; LAMANDÉ, M.; KELLER, K.; PUE, J.; CORNELIS, W.M., LABOURIAU, R.; KELLER, T. The challenge in estimating soil compressive strength for use in risk assessment of soil compaction in field traffic. **Advances in Agronomy**, v.178, p.61-105, 2023.
- SEEHUSEN, T.; RIGGERT, R.; FLEIGE, H.; HORN, R.; RILEY, H. Soil compaction and stress propagation after different wheeling intensities on a silt soil in South-East Norway. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B – Soil & Plant Science**, v.69, n.4, p.343-355, 2019.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; CASTRO, M.B.; OLIVEIRA, L.F.C.; COSTA, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - Modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.3, p.404-413, 2010.
- SILVA, R.B.; MASQUETTO, B.J.; LANÇAS, K.P.; SILVA, F.A.M. Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.2, p.416-427, 2015.
- SILVA, R.B.; IORI, P.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, D.M.G.; VISCHI FILHO, O.J.; SILVA, F.A.M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência & Agrotecnologia**, v.40, n.3, p.265-278, 2016.
- SOMAVILLA, A.; BATISTÃO, A.C.; HOLTTHUSEN, D.; ANTUNES, R.R.; GUBIANI, P.I. Role of compaction and drying-wetting cycles on the capability of precompression stress to indicate load history of heavily disturbed soils. **Geoderma**, v.401, e115344, 2021.
- STETTLER, M.; KELLER, T.; WEISSKOPF, P.; LAMANDÉ, M.; LASSEN, P.; SCHJØNNING, P. Terranimo® – a web-based tool for evaluating soil compaction. **Landtechnik**, v.69, n.3, p.132-137, 2014.