

RISCO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE TRANSBORDO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Palavras-Chave: ESTRUTURA DO SOLO; ATRIBUTOS DO SOLO; TRÁFEGO AGRÍCOLA

Autores(as):

DEIVIDSON DE PAULA, FEAGRI-UNICAMP

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (orientador), FEAGRI-UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A intensificação da mecanização das operações agrícolas utilizando máquinas mais eficientes para reduzir custos e aumentar o rendimento operacional tem sido acompanhada pelo aumento da massa das máquinas agrícolas, incrementando as pressões impostas no solo e consequentemente os níveis de compactação (KELLER et al., 2019). A compactação do solo potencializa a degradação do seu funcionamento físico, químico e biológico, sendo necessário, portanto, a adoção de práticas de manejo para restabelecer ou preservar as funções do solo.

A modelagem da distribuição das tensões no solo e a predição do risco à compactação possibilita tomar medidas de prevenção, e baseia-se na relação solo-máquina a partir da tensão deformação do solo (DISERENS, 2009; STETTLER et al., 2014). A predição do risco de compactação baseia-se na comparação da tensão vertical no solo com alguma estimativa da resistência do solo como a pressão de pré-consolidação, pois o solo apresenta deformação plástica ou permanente quando as tensões atuantes jamais foram experimentadas (KELLER et al., 2007; DISERENS et al., 2014).

Frente ao cenário exposto, as cargas impostas no solo pelos rodados das máquinas utilizadas na operação de colheita da cana-de-açúcar, principalmente na operação de transbordo, resultam em elevados níveis de compactação do solo que promovem alterações na sua estrutura deteriorando o funcionamento e à perda da produtividade e longevidade da cultura. Por conseguinte, propõe-se nesta pesquisa a validação da seguinte hipótese: que o uso do caminhão canavieiro no transporte da cana-de-açúcar minimiza a compactação do solo na linha de plantio comparado com sistemas de transporte que utilizam transbordos rebocados por trator.

Assim, o objetivo desta pesquisa foi simular a distribuição de tensões aplicadas no solo por diferentes transbordos utilizados na colheita da cultura da cana-de-açúcar, quantificar a pressão de pré-consolidação e estimar o risco de compactação num Latossolo Vermelho distrófico sob cultivo da cana-de-açúcar.

METODOLOGIA:

O experimento foi conduzido em área experimental localizada nas dependências da Usina Cerradão, no município de Frutal, Estado de Minas Gerais, nas seguintes coordenadas geográficas: 19°56' de latitude sul e 49°07' de longitude oeste; com altitude média de 520 m acima do nível do mar. O clima da região é tropical com estação seca (Aw) segundo a classificação climática de Köppen e Geinge, com

precipitação média anual de 1.444 mm e temperatura média de 24 °C (ALVARES et al., 2013). O solo apresenta textura média com 290 g kg⁻¹ de argila, 630 g kg⁻¹ de areia e 80 g kg⁻¹ de silte e foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico.

A pesquisa utiliza um delineamento experimental de blocos ao acaso, contendo três tratamentos e três repetições, totalizando 9 parcelas experimentais, cada uma com dimensões de 50 m de comprimento por 30 m de largura (1.500 m²). Em cada parcela experimental foram plantadas 20 linhas de cana-de-açúcar com espaçamento de 1,5 m entre as linhas de plantio e em sentido paralelo ao comprimento da parcela. Os tratamentos correspondem a diferentes configurações de transbordo utilizados durante a operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, sendo eles:

T1 (2T/10) - conjunto trator com 185 cv + dois transbordos com capacidade de 10 toneladas cada: trator VALTRA - BH180, com potência nominal/máxima de 185 cv, bitola de 2,10 m, pneus dianteiros 18-4R26 e traseiros 24-5R32 e massa de 10,5 toneladas. O transporte da cana-de-açúcar é realizado em dois transbordos ANTONIOSI - ATA 10500, com capacidade individual 10 toneladas de cana, massa aproximada de 7,3 toneladas, bitola de 3,00 m e pneus 600/50-22,5.

T2 (1T/30) - conjunto trator 230 cv + transbordo com capacidade de 30 toneladas: trator VALTRA - BH180, com potência nominal/máxima de 230 cv, bitola de 2,10 m, pneus dianteiros 600/65R28 e pneus traseiros 710/7R38 e massa aproximada de 10,5 toneladas. O transporte da cana-de-açúcar é realizado em um transbordo TMA - VTX 6030, com capacidade para transportar 30 toneladas de cana, massa aproximada de 16,9 toneladas, bitola de 3,00 m e pneus 600/50-22,5.

T3 (1C/20) - conjunto caminhão + transbordo com capacidade de 21 toneladas: caminhão Mercedes Benz modelo Axxor 3131, com potência nominal/máxima de 230 cv, bitola de 3,0 m, pneus dianteiros 400/70R20, pneus traseiros 560/60R-22,5 e massa de cerca de 10,5 toneladas.

Para a geração dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, a pressão de pré-consolidação (σ_p) foi determinada pelo ensaio de compressão uniaxial utilizando um consolidômetro automatizado CNTA-IHM/BR-001/07 (Maschetto Automação e Equipamentos, Botucatu, Brasil) descrito por Silva et al. (2015). Para obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo de cada camada, os valores de σ_p foram ajustados a uma regressão exponencial em função do teor de água gravimétrico conforme proposta de Dias Júnior (2003).

A estimativa e propagação das tensões no solo impostas pelas cargas estáticas das máquinas foi feita utilizando a planilha Tyres/Tracks and Soil Compaction – TASC 3.0 descrita por Diserens et al. (2014). A obtenção dos parâmetros dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo assim como dos intervalos de confiança a 95% foi feita por meio do software Sigma Plot 14.0 (Systat Software Inc®). Os modelos obtidos para as camadas de solo foram linearizados [transformação logarítmica: $\text{Log}(\sigma_p) = a + b \times \theta$] e depois comparados pelo teste de homogeneidade de modelos lineares conforme Snedecor e Cochran (1989).

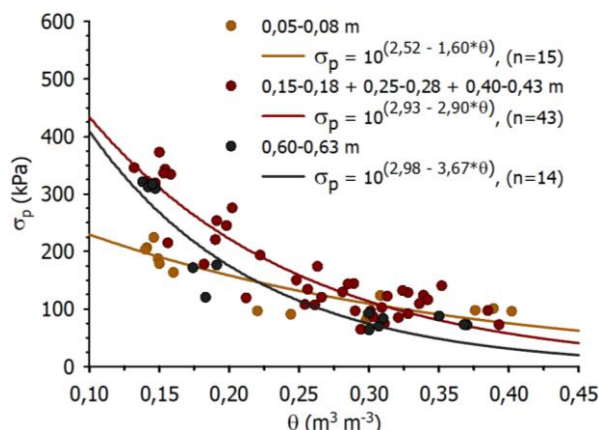
Os valores de propagação das tensões no perfil do solo assim como os valores de propagação das tensões verticais sob o centro do pneu obtidos na planilha TASC e da pressão de pré-consolidação nas diferentes profundidades, foram plotados também no software Sigma Plot 14.0 (Systat Software Inc®) para obtenção das isolinhas de tensão (conjunto de isóbaras formado sob a área de contato pneu-solo) e dos gráficos de propagação de tensões com o ponto de estabilidade que definem a profundidade de ocorrência de risco de compactação do solo, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os modelos indicaram uma maior capacidade de suporte de carga nas profundidades 0,15-0,18, 0,25-0,28 e 0,40-0,43 m quando comparado com a profundidade de 0,05-0,08 m (para $\theta < 0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), com valores de σ_p variando entre 435 e 105 kPa (para $0,10 < \theta < 0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), do que a profundidade 0,60-

0,63 m (em toda a faixa de θ avaliada) (Figura 1). Na profundidade de 0,05-0,08 m, a magnitude de redução da capacidade de suporte de carga foi menor com o aumento de θ em comparação com as outras profundidades estudadas - os valores de σ_p variaram de 230 a 65 kPa na faixa de θ entre 0,10 e 0,45 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. A profundidade de 0,60-0,63 m apresentou valores de σ_p maiores que da profundidade 0,05-0,08 m para $\theta < 0,28 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ cujo valor de σ_p foi de 150 kPa.

Figura 1. Modelos de capacidade de suporte de carga como função do teor de água [$\sigma_p = 10^{(a+b \times \theta)}$] para um Latossolo Vermelho distrófico antes da primeira colheita mecanizada da cana-de-açúcar.



A menor capacidade de suporte de carga na profundidade de 0,05-0,08 m indica uma maior susceptibilidade à compactação do solo (Figura 1). Na profundidade de 0,60-0,63 m observou-se baixos valores de capacidade de suporte de carga e desde que as cargas aplicadas pelas máquinas sejam transmitidas até esta profundidade, poderá haver compactação do subsolo. Maiores valores de capacidade de suporte de carga também foram constatados nas outras profundidades amostradas. Resultados similares foram obtidos por Guimarães Júnnyor et al. (2019) num Nitossolo Vermelho eutrófico de textura argilosa antes da primeira colheita da cana-de-açúcar. Esteban et al. (2020) reportam menor capacidade de suporte de carga na camada superficial do solo de um Latossolo Vermelho de textura média após terceira colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

As operações de preparo do solo durante a reforma do canavial, que ocorre aproximadamente a cada 5 anos, são realizadas com o intuito de eliminar a compactação do solo conforme relatam Barbosa et al. (2019). Contudo, elas anulam o histórico acumulado de tensão no solo (SEVERIANO et al., 2010). Por outro lado, a maior capacidade de suporte de carga do solo nas profundidades 0,15-0,18, 0,25-0,28 e 0,40-0,43 m podem ser devidas ao efeito acumulativo das cargas dos implementos de preparo e das operações mecanizadas realizadas antes da primeira colheita da cultura (Figura 1). No entanto, na profundidade 0,60-0,63 m, os valores intermediários de capacidade de suporte de carga do solo para $\theta < 0,25 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ podem ser devidas à compactação acumulada no subsolo, gerada antes do estabelecimento do experimento e que não foi desfeita pelas operações de preparo de solo que não atingiram essa camada. Os resultados de Cherubin et al. (2016) atestam que as operações de preparo realizadas durante a renovação do canavial aliviam a compactação do solo, mas o efeito é limitado à camada superficial e tem curta duração. O aumento na capacidade de suporte de carga do solo nas profundidades 0,15-0,18, 0,25-0,28 e 0,40-0,43 m está em consonância com Keller et al. (2019) que demonstraram que o aumento na massa das máquinas tem resultado na compactação do subsolo, a qual pode ser persistente.

O risco de compactação do solo e a profundidade em que ocorre, assim como as configurações das máquinas durante a operação de transbordo da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 1 e Figura 2. Considera-se 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 (Figura 1) e com o teor de água do solo durante a operação de colheita. Os resultados indicam que todos os pneus do caminhão transbordo (1C/20), induziram a risco de compactação até a profundidade de 0,15 m, sendo maior para os pneus traseiros (eixos 3 e 4) ao impor as maiores σ_z no solo e com valores superiores à capacidade de suporte

de carga do solo ou σ_p (Figura 2c). Os sistemas de transbordo 2T/10 e 1T/30 apresentaram risco de compactação pelos rodados dos transbordos até as profundidades de 0,09 e 0,11 m, respectivamente. Contudo, os tratores utilizados para rebocar os transbordos aplicaram cargas que foram insuficientes para caracterizar risco de compactação do solo nas condições deste experimento.

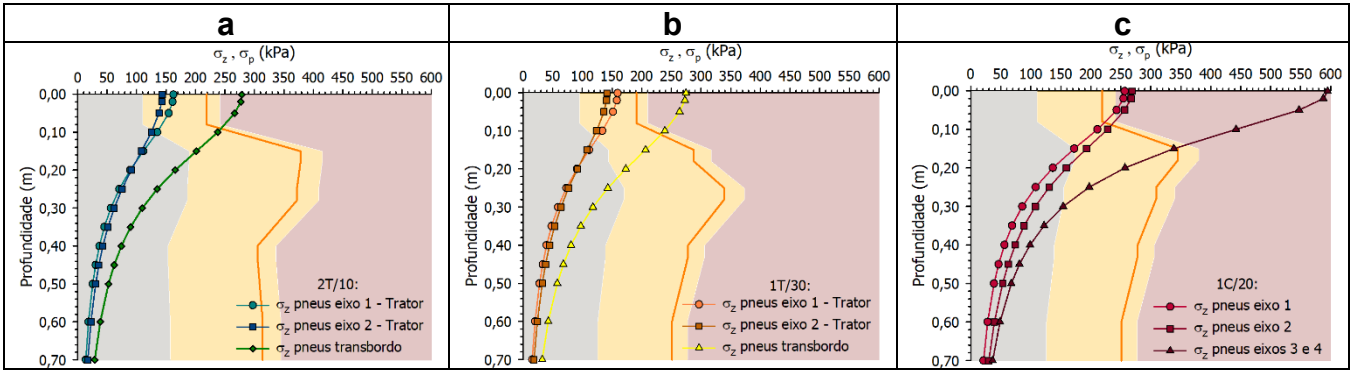
Tabela 1. Profundidade em que ocorre risco de compactação do solo pelas máquinas utilizadas no transbordo da cana-de-açúcar simuladas usando a pressão de pré-consolidação como ponto de estabilidade e zonas de risco conforme critérios propostos no modelo Terranimo®.

Tratamento	Máquina	Eixo	PRCS (m)	PCE (m)	PCRC (m)
2T/10	Transbordo VTX 5022	1-4	0,00-0,10	0,00-0,09	0,09-0,20
	Trator Case IH Puma 185	1 (D)	-	-	0,00-0,10
		2 (T)	-	-	0,00-0,09
1T/30	Transbordo VT 10	1-2	0,00-0,09	0,00-0,08	0,09-0,17
	Trator Case IH Puma 230	1 (D)	-	-	0,00-0,13
		2 (T)	-	-	0,00-0,12
1C/20	Transbordo VTX 6030	1-5	0,00-0,11	0,00-0,10	0,10-0,22
	Caminhão MB - AXOR 3131 com Transbordo Gruner ATR 320X	1	0,00-0,08	0,00-0,05	0,05-0,15
		2	0,00-0,09	0,00-0,08	0,08-0,18
		3-4	0,00-0,15	0,00-0,14	0,14-0,30

D = dianteiro; T = traseiro; PRCS = profundidade de risco de compactação simuladas usando a pressão de pré-consolidação como ponto de estabilidade; PCE e PCRC = profundidade onde a compactação é esperada e onde há considerável risco de compactação, respectivamente, conforme o modelo Terranimo®.

Segundo o critério de zonas de risco de compactação usado no modelo Terranimo®, é esperado que aconteça compactação por todos os pneus no tratamento (1C/20), alcançando profundidade de 0,14 m nos eixos 3 e 4 bem como havendo considerável risco de ocorrer compactação na profundidade de 0,14-0,30 m (Tabela 1 e Figura 2c). Compactação do solo também é esperada sob os pneus dos transbordos 2T/10 e 1T/30 na profundidade 0,08 e 0,10 m bem como há considerável risco de ocorrer compactação até profundidades de 0,17 e 0,22 m, respectivamente (Tabela 1 e Figuras 2a e 2b). 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 0,13 m.

Figura 2. Tensões verticais (σ_z) no solo simuladas sob o centro dos pneus das máquinas utilizadas no transbordo da cana-de-açúcar, pressão de pré-consolidação do solo em profundidade (σ_p) para o teor de água no solo no momento da colheita mecanizada e, critérios usados para avaliação do risco de compactação: σ_p como ponto de estabilidade e zonas de risco de compactação conforme o modelo Terranimo® ($\sigma_z < 0,5\sigma_p$ = não há risco de compactação; $0,5\sigma_p < \sigma_z < 1,1\sigma_p$ = considerável risco de compactação; $\sigma_z > 1,1\sigma_p$ = compactação é esperada). a) 2T/10; b) 1T/30; c) 1C/21.



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 foi imposto pelos pneus traseiros (eixos 3 e 4) do transbordo composto por caminhão (Trasbordo 1C/20), que aplicou as maiores tensões no solo como resultado dos elevados valores de carga na roda e da elevada pressão de inflação. Nos sistemas de transbordo rebocados por tratores (2T/10 e 1T/30), as tensões transmitidas no solo pelos pneus dos transbordos foram similares entre os tratamentos, impondo similar risco de compactação.

BIBLIOGRAFIA

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.
- BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; TENELLI, S.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.195, p.1-11, 2019.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v.267, p.156-168, 2016.
- DIAS JÚNIOR, M. S. **A soil mechanics approach study soil compaction**. In: ACHYUTHAN, H. (Ed.). Soil and soil physics in continental environment. Chennai: Allied Publishers Private, p.179-99, 2003.
- 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.; 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 ETH, Switzerland, p.6-10, 2014.
- ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, v.362, p.97-114, 2020.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; LIMA, C. C.; VITTI, A. C.; FIGUEREIDO, G. C.; DECHEN, S. C. F. Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. **Scientia Agricola**, v.76, n.6, p.4509-517, 2019.
- 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.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v.194, 104293, 2019.
- 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.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. Ed. Ames: Iowa State University Press. 1989, 503 p.
- 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.
- STETTTLER, 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.