

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**MODELAGEM DA CURVA DE COMPRESSÃO E DA
PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO DO SOLO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rafael Ziani Goulart

**Santa Maria, RS, Brasil
2012**

MODELAGEM DA CURVA DE COMPRESSÃO E DA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO DO SOLO

Rafael Ziani Goulart

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo.**

Orientador: Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Goulart, Rafael Ziani
MODELAGEM DA CURVA DE COMPRESSÃO E DA PRESSÃO DE
PRECONSOLIDAÇÃO DO SOLO / Rafael Ziani Goulart.-2012.
67 p.; 30cm

Orientador: Dalvan José Reinert
Coorientador: José Miguel Reichert
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2012

1. capacidade de suporte de carga 2. compactação do
solo 3. compressibilidade 4. mecânica do solo 5. função de
pedotransferência I. Reinert, Dalvan José II. Reichert,
José Miguel III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**MODELAGEM DA CURVA DE COMPRESSÃO E DA PRESSÃO DE
PRECONSOLIDAÇÃO DO SOLO**

elaborada por
Rafael Ziani Goulart

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

Dalvan José Reinert, PhD.
(Presidente/Orientador)

Jean Paolo Gomes Minella, PhD. (UFSM)

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki, Dr. (UFPEL)

Santa Maria, 24 de agosto de 2012.

Dedico este trabalho aos meus pais Edi Vernei Souza Goulart e Maria Raquel Ziani Goulart, à minha irmã Fernanda Ziani Goulart e à minha companheira Lizielle Souza de Oliveira, pelo apoio no prosseguimento desta longa caminhada que juntos estamos percorrendo.

VOCÊS SUSTENTAM MINHA EXISTÊNCIA!

AGRADECIMENTOS

À Deus e À Nossa Senhora, por me guiarem e colocarem sempre em meu caminho pessoas tão especiais como as que aqui serão lembradas.

Aos meus pais Edi Vernei Souza Goulart e Maria Raquel Ziani Goulart por todo o amor, carinho, paciência, educação, ensinamentos, apoio, oportunidades e por terem sido exemplo de honestidade e dignidade. Também agradeço a minha irmã Fernanda Ziani Goulart pelo amor fraterno, pelo apoio e grande incentivo.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, professor Dalvan José Reinert, pela oportunidade, pela orientação e ensinamentos.

Ao professor José Miguel Reichert pela co-orientação, amizade, ensinamentos e oportunidades durante todo este período.

Ao Heverton Heinz, pela dedicação em solucionar dúvidas frequentes na secretaria do PPGCS.

Aos colegas e amigos da Física do Solo, Alan de Oliveira, Bernardo da Silva, Elói Paulus, Eracilda Fontanela, Lorenzo Rolim, Luiz Eugênio Jacobs, Júlio Soares, Marcelo Mentges, Marta Drescher, Miriam Rodrigues, Neiva Gelain, Núbia Pereira e Rodrigo Ludwig.

Ao meu colega e grande amigo Paulo Ivonir Gubiani faço um agradecimento especial pela oportunidade do convívio, pela paciência, pelos ensinamentos e pela humildade em compartilhar o conhecimento imenso que possui de uma maneira a torná-los acessíveis e compreensíveis. A você meu amigo Gubiani, meu MUITO OBRIGADO ou meu "MIL GRACIAS", como estas acostumado a ouvir.

À minha companheira Lizielle Souza de Oliveira, agradeço de forma especial tudo que fizeste e faz por mim. O auxílio nos trabalhos de campo, a compreensão nos momentos de viagem e nas longas horas de laboratório, além do apoio e incentivo para a continuidade dos estudos. A você minha querida, meu MUITO OBRIGADO!

A todos indistintamente, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e de minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

MODELAGEM DA CURVA DE COMPRESSÃO E DA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO DO SOLO

AUTOR: RAFAEL ZIANI GOULART

ORIENTADOR: DALVAN JOSÉ REINERT

Local e data da defesa: Santa Maria, 24 de agosto de 2012.

A pressão de preconsolidação (σ_p) é obtida da curva de compressão do solo de forma gráfica visual, matemática ou associando ambas e é uma estimativa de sua capacidade de suporte de carga. A fim de se retirar a subjetividade do método gráfico visual, há necessidade de descrição matemática (uso de modelos) da curva de compressão. Porém, os resultados de pesquisa não fornecem subsídios para a escolha de um modelo cuja σ_p resultante represente, de maneira confiável, a capacidade de suporte de carga do solo. Entretanto, se algum modelo a representar, a σ_p deverá ser uma função da densidade e conteúdo de água do solo, mantidas constantes outras propriedades. O objetivo deste trabalho foi conhecer a variabilidade na pressão de preconsolidação provocada por diferentes modelos e opções de ajuste desses modelos à curva de compressão e avaliar a relação da pressão de preconsolidação com a densidade do solo (D_s), conteúdo volumétrico de água (θ) e macroporosidade do solo (M_a). Para isso, foi realizado o ensaio de compressão uniaxial para 300 amostras provenientes de um Latossolo Vermelho Distroférico típico, com textura argilosa, com ampla variação D_s e θ . A pressão de preconsolidação foi determinada por meio estritamente matemático, a partir do ajuste de dez modelos, onde sete deles consistiram em variações do modelo de van Genuchten (1980) e os demais foram propostos por Friton (2001), Assouline (2002) e Gregory et al. (2006). Os modelos propostos por Gregory e Friton possibilitaram a obtenção da σ_p para apenas 62 e 56 % das curvas, respectivamente, já as variações do modelo de van Genuchten viabilizam o cálculo da σ_p para no mínimo 90 % das curvas. Em três das variações do modelo de van Genuchten, foi possível obter a σ_p em 100% das curvas. A variação da σ_p produzida pelas diferentes opções de descrição da curva de compressão compromete o significado físico da σ_p para representar a capacidade de suporte de carga do solo. Da mesma forma, D_s , θ e M_a , mesmo que influenciem a capacidade de suporte de carga do solo, não explicaram mais que 58% da variação da σ_p produzida com o uso de diferentes modelos. Com os critérios utilizados, não é possível eleger um modelo em relação aos demais que possibilite estimar de maneira mais adequada, através da σ_p , a capacidade de suporte de carga do solo, o que limita o uso desse parâmetro como um indicador para o manejo dos solos agrícolas. Diante desse resultado, foi

investigado se a porcentagem de deformação da amostra em função das cargas aplicadas estaria melhor relacionada com D_s , θ e M_a . Considerou-se um limite de deformação prudente do ponto vista físico, aquela deformação onde a M_a permaneça maior que 10%. O uso do limite de manutenção de 80 % do índice de vazios inicial (M_{ε_i}) desloca as deformações para a região plástica das curvas de todas as faixas de densidade e, por isso, não pode ser utilizado para solos com estrutura mais comprometida pela compactação. A carga para atingir determinada porcentagem de M_{ε_i} é melhor explicada pela variação da D_s e θ . As funções de pedotransferência da carga para a M_{ε_i} entre 85 e 87,5% resultaram em maiores coeficientes de determinação (0,74), havendo potencial da utilização destes valores como limites críticos de manutenção da porosidade sem haver degradação da qualidade física do solo.

Palavras-chave: capacidade de suporte de carga, compactação do solo, compressibilidade, mecânica do solo, função de pedotransferência.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

MODELING OF CURVE OF COMPRESSION AND OF THE SOIL PRECONSOLIDATION PRESSURE

AUTHOR: RAFAEL ZIANI GOULART

ADVISER: DALVAN JOSÉ REINERT

Place and date of the defense: Santa Maria, Aug 24, 2012.

The preconsolidation pressure (σ_p) is obtained from the curve of the soil compression visual graphical form, mathematical or associating both and is an estimate of its load-bearing capacity. In order to remove the subjectivity of the visual graphical method is need for mathematical description (models using) of the compression curve. However, research results do not provide subsidies for the choice of a model whose σ_p represents well the resulting load-bearing capacity of soil, but if some model to represent, the σ_p should be a function of density and water content soil, other properties remain constant. The objective of this study was to understand the variability in the preconsolidation pressure caused by different models and options to adjust these models to the compression curve and evaluate the relationship of preconsolidation pressure with bulk density (D_s), volumetric water content (θ) and macroporosity (M_a). For this, we performed the uniaxial compression test of 300 samples from a Hapludox, clayey, with wide variation D_s and θ . The preconsolidation pressure was determined by strictly mathematical, from the set of ten models, where seven of them consisted of variations of the model van Genuchten (1980) and others have been proposed by Friton (2001), Assouline (2002) and Gregory et al. (2006). The model proposed by Gregory and Friton possible to obtain the σ_p for only 62 and 56% of the curves, respectively, the variations of the model van Genuchten were enable the calculation of σ_p at least 90% of the curves. In three of the variations of the van Genuchten model, it was possible to get σ_p in 100% of the curves. The range of σ_p produced by the various options described in compression curve affects the physical significant of σ_p to represent the load bearing capacity of the soil. Likewise, D_s , θ and M_a , which influence the same load bearing capacity of the soil, not explained more than 58% of the variation of σ_p produced using different models. With the criteria used, it is not possible to choose one model over the other which allows to estimate more adequately by σ_p , the load bearing capacity of the soil, which limits the use of this parameter as an indicator for soil management agricultural. Given this result, it was investigated whether the percentage of deformation of the sample as a function of the applied loads would be more closely related to D_s , θ , and M_a was considered a safe limit of deformation of the physical viewpoint, that M_a deformation where the remains higher than 10%. The

use of maintenance limit of 80% of voids index ($M_{\epsilon i}$) displaces the deformation to the plastic region of the curves of all the density ranges and therefore cannot be used for soil with structure more affected by compaction. The load to achieve a certain percentage ($M_{\epsilon i}$) is best explained by the variation of D_s and θ . The pedotransfer functions to load in $M_{\epsilon i}$ between 85 and 87.5% resulted in higher coefficients of determination (0.74), having potential use of such values as critical limits to maintenance of porosity without degradation of soil physical quality.

Keywords: load-bearing capacity, soil compaction, compressibility, soil mechanics, pedotransfer function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo da determinação da pressão de preconsolidação obtido da curva de compressão pelo método de Casagrande (SILVA, et al., 2002b).....	19
Figura 2 - Escarificação-PDE (a) e compactação adicional-PDC (b) (Fotos: Paulo Ivonir Gubiani, 2010)	28
Figura 3 - Consolidômetro, modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises) com indicador digital da carga aplicada e leitura analógica da deformação da amostra.....	29
Figura 4 - Características da primeira ($d\varepsilon/d\sigma'$) e segunda derivadas ($d^2\varepsilon/d^2\sigma'$) e da curvatura (C) da função de compressão $\varepsilon = f(\sigma)$, $\{\sigma' = \text{Log}_{10}\sigma\}$, que possibilitam calcular objetivamente o ponto de máxima curvatura (PMC) e o ponto de inflexão (PI) (Paulo Ivonir Gubiani, informações não publicadas)	32
Figura 5 - Distribuição de frequência acumulada de coeficientes de determinação (R^2) para os diferentes modelos testados.....	37
Figura 6 - Comparação entre os diferentes modelos testados utilizando como referência o modelo vG 4 (Relação 01:01).....	30
Figura 7 - Média e desvio padrão da σ_p de 101 curvas onde foi possível calcular a σ_p nos dez diferentes modelos testados (vG1, vG2, vG3, vG4, vG5, vG6, vG7, Frit, Ass e Gomp)	42
Figura 8 - Variação da macroporosidade (M_a) com a densidade do solo (D_s) resultante de deformação tolerada para que sejam mantidos 70%, 80% e 90% do índice de vazios inicial. $M\varepsilon 70\% = 70\%$ de manutenção do índice de vazios inicial, e assim sucessivamente	50
Figura 9 - Curvas de compressão correspondentes a densidades do solo baixa, média e alta (1,06; 1,24 e 1,40 g cm ⁻³ , respectivamente) e índice de vazios correspondente ao $\varepsilon 90\%$ para cada curva (linhas tracejadas)....	52
Figura 10 - Curvas de compressão correspondentes a densidades do solo baixa, média e alta (1,06; 1,24 e 1,40 g cm ⁻³ , respectivamente) e índice de vazios correspondente ao $\varepsilon 80\%$ para cada curva (linhas tracejadas).....	53
Figura 11 - Curvas de compressão correspondentes a três amostras de solo com densidade igual a 1,24 g cm ⁻³ , com diferente conteúdo volumétrico de água ($\theta - \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e manutenção do índice de vazios correspondente a 90 e 80 % do índice de vazios inicial ($M\varepsilon i_{90\%}$ e $M\varepsilon i_{80\%}$, respectivamente - linhas tracejadas).....	54

Figura 12 - Algoritmo desenvolvido em Visual Basic for Application em planilha eletrônica Excel[®] utilizado para execução dos cálculos (Paulo Ivonir Gubiani, informações não publicadas) 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos utilizados descrever os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial.....	31
Tabela 2 - Parâmetros estatísticos para os valores de densidade do solo, macroporosidade e conteúdo volumétrico de água em 300 amostras utilizadas em ensaios de compressão uniaxial.....	35
Tabela 3 - Pressão de preconsolidação (kPa) Mínima, Máxima e Média para os diferentes modelos testados.....	36
Tabela 4 - Relação existente entre a pressão de preconsolidação (σ_p) resultante da utilização de diferentes modelos e a σ_p produzida com o uso do modelo vG4.....	40
Tabela 5 - Equações oriundas de diferentes modelos de descrição da curva de compressão para estimar a pressão de preconsolidação em função da densidade do solo (D_s) e conteúdo volumétrico de água (θ), segundo modelo adaptado de Imhoff et al. (2004).....	44
Tabela 6 - Equações oriundas de diferentes modelos de ajuste da curva de compressão para estimar a pressão de preconsolidação em função da densidade do solo (D_s) e conteúdo volumétrico de água (θ), segundo modelo adaptado de Busscher (1990).....	45
Tabela 7 - Equações oriundas de diferentes modelos de ajuste da curva de compressão para estimar a pressão de preconsolidação (σ_p) em função da densidade do solo (D_s), conteúdo volumétrico de água (θ) e macroporosidade do solo (M_a), segundo modelo adaptado de Imhoff et al. (2004).....	47
Tabela 8 - Efeito da diminuição do índice de vazios na macroporosidade para a faixa de densidade verificada no solo deste experimento.....	49
Tabela 9 - Equações de estimativa da carga (σ) aplicada ao solo para diferentes porcentagens de manutenção do índice de vazio inicial (M_{ϵ_i}) em função da densidade do solo (D_s) e conteúdo volumétrico de água (θ).....	57
Tabela 10. Equações de estimativa da carga (σ) aplicada ao solo para diferentes porcentagens de manutenção do índice de vazio inicial (M_{ϵ_i}) em função da densidade do solo (D_s), conteúdo volumétrico de água (θ) e macroporosidade do solo (M_a), usando o modelo adaptado de Imhoff et al. (2004).....	58

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Hipótese.....	17
1.2 Objetivo.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 O processo de compactação e sua avaliação.....	18
Efeito das propriedades do solo na capacidade de suporte de	
2.2 carga.....	20
2.3 Modelagem da pressão de preconsolidação.....	22
2.4 Modelagem da curva de compressão.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1 Estudo exploratório com ênfase na deformação do solo.....	48
5 CONCLUSÕES.....	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

A compactação do solo implica em modificações na sua estrutura, como o aumento da densidade e da resistência mecânica do solo, diminuição da infiltração e da condutividade à água e ao ar, fatores que podem provocar degradação do solo e perdas na produção das culturas. No sistema de plantio direto, é mais difícil remover a compactação do solo, visto que a mobilização mecânica não é prática recomendada, a não ser na linha de semeadura. Por isso, uma das grandes preocupações da pesquisa é desenvolver orientações de manejo do solo a fim de evitar a ocorrência de compactação em áreas de plantio direto.

Os principais fatores causadores da compactação são o tráfego de máquinas e implementos agrícolas e o pisoteio animal. As pressões exercidas no solo por estes agentes causarão compactação se excederem a capacidade de suporte de carga do solo, que é uma propriedade do solo dependente da constituição e da organização da matriz do solo e da mudança provocada pela água na resistência ao deslocamento dos constituintes da matriz. A variação desses fatores desloca o comportamento elástico (deformações recuperáveis) e plástico (deformações não recuperáveis) para regiões de pressões diferentes.

Medidas de propriedades como densidade, conteúdo de água ou grau de saturação, embora não descrevam as alterações em escala de partículas, indicam que quanto maior a densidade, mais o solo resiste à deformação, e quanto maior o conteúdo de água, maior é a suscetibilidade do solo à deformação. O aumento da densidade está relacionado ao aumento da força de fricção e de coesão, proveniente do maior número de ligações existentes entre as partículas. Diferentemente, o aumento do conteúdo de água, aumenta a espessura do filme de água que envolve as partículas o que reduz a coesão e o atrito entre elas. Assim, o conhecimento da participação desses fatores no comportamento compressivo do solo auxilia no manejo da compactação do solo.

A curva de compressão tem sido utilizada para descrever o comportamento compressivo do solo. Ela relaciona o índice de vazios (ou densidade do solo) com o logaritmo da carga aplicada sobre o solo. A partir dela é obtida uma propriedade conhecida como pressão de preconsolidação (σ_p). A σ_p tem sido utilizada como indicador da capacidade de suporte de carga do solo e é obtida da curva de

compressão de forma gráfica visual, matemática ou associando ambas. Na maioria dos casos, a σ_p é obtida por meio da aplicação do procedimento desenvolvido por Casagrande (1936), que empresta seu nome ao método. Em outros casos, procedimentos mais simples são utilizados.

Para a aplicação matemática do procedimento de Casagrande, a fim de retirar subjetividade do método gráfico visual, há necessidade da descrição matemática da curva de compressão. Para isso, vários modelos e variações desses modelos foram propostos e vêm sendo utilizados nas pesquisas. Entretanto, os valores de σ_p obtidos com diferentes modelos não são concordantes na maioria das publicações, o que tem levantado questionamentos sobre a incerteza de usar a σ_p para representar a capacidade de suporte de carga do solo e como um indicador para o manejo de solos agrícolas.

Até o momento, os resultados de pesquisas não fornecem subsídios para escolha de um modelo cuja σ_p resultante represente melhor a capacidade de suporte de carga do solo. Porém, espera-se que, se algum modelo resultar σ_p que represente a capacidade de suporte de carga do solo, então a σ_p desse modelo deve ser uma função da densidade e conteúdo de água, pois estas últimas são as principais variáveis que determinam a deformação de uma matriz de solo com pequena variabilidade em outras variáveis que também afetam a deformação, como granulometria e matéria orgânica.

Havendo relação da σ_p com densidade e conteúdo de água, por serem essas variáveis de fácil obtenção, as mesmas podem ser úteis em funções de pedotransferência para estimar a capacidade de suporte de carga do solo através da σ_p . Assim, nesta dissertação é discutida a problemática em torno da confiabilidade da σ_p para representar a capacidade de suporte de carga do solo e servir como parâmetro para orientação das operações agrícolas mecanizadas.

1.1. Hipótese

A variabilidade causada na σ_p pelos diferentes modelos de descrição da curva de compressão compromete o uso da σ_p como uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo.

1.2. Objetivo

Conhecer a variabilidade na pressão de preconsolidação provocada por diferentes modelos e opções de ajuste desses modelos à curva de compressão e avaliar a relação da pressão de preconsolidação com a densidade do solo, o conteúdo volumétrico de água e a macroporosidade do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de compactação e sua avaliação

A compactação do solo consiste no processo de densificação que ocorre quando uma pressão externa é aplicada sobre o mesmo (SOANE; VAN OUVKERK, 1994). O tráfego de máquinas agrícolas, aliado a condições inadequadas de umidade, é considerado fator determinante para a ocorrência do processo de degradação ocasionado pela compactação (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; IMHOFF et al., 2001; LIMA et al., 2006; VEIGA et al., 2007). A ausência de revolvimento no sistema de semeadura direta (HÅKANSSON; MEDVEDEV, 1995), o aumento no tamanho e peso das máquinas agrícolas (MOUAZEN et al., 2003) e a utilização equivocada da pressão de inflação dos pneus agrícolas (HÅKANSSON, 2005) também são fatores determinantes na ocorrência da compactação.

Propriedades físico-mecânicas do solo têm sido utilizadas para avaliar a susceptibilidade à compactação e o momento adequado para executar as operações mecanizadas no campo (LEBERT; HORN, 1991; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999). Essas propriedades são obtidas a partir da relação entre o estresse aplicado a algum parâmetro relacionado ao estado de compactação do solo e medidos em amostras cilíndricas tipicamente em um equipamento de compressão uniaxial (oedômetro).

Comumente, essas propriedades relativas ao comportamento compressivo do solo são obtidas da curva de compressão, que é representada graficamente pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios (HOLTZ; KOVACS, 1981). Como exemplos dessas propriedades, citam-se o índice de compressão (C_c), que é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação, e a pressão de preconsolidação (σ_p), que é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; SILVA et al., 2000; SILVA et al., 2001).

A compressibilidade do solo indica a resistência do solo ao decréscimo do volume quando submetido a uma carga mecânica (HORN; LEBERT, 1994) e a

capacidade de suporte de carga do solo agrícola é uma analogia ao conceito de capacidade de suporte de carga do solo proposto na engenharia civil de fundações e, através do método de Casagrande, é possível determinar a σ_p (HOLTZ; KOVACS, 1981) com a utilização de um procedimento gráfico desenvolvido pelo autor. O método consiste em traçar a curva de compressão do solo, alocando-se, no eixo das ordenadas, o índice de vazios do solo e, no eixo das abscissas, o logaritmo da pressão aplicada (Figura 1).

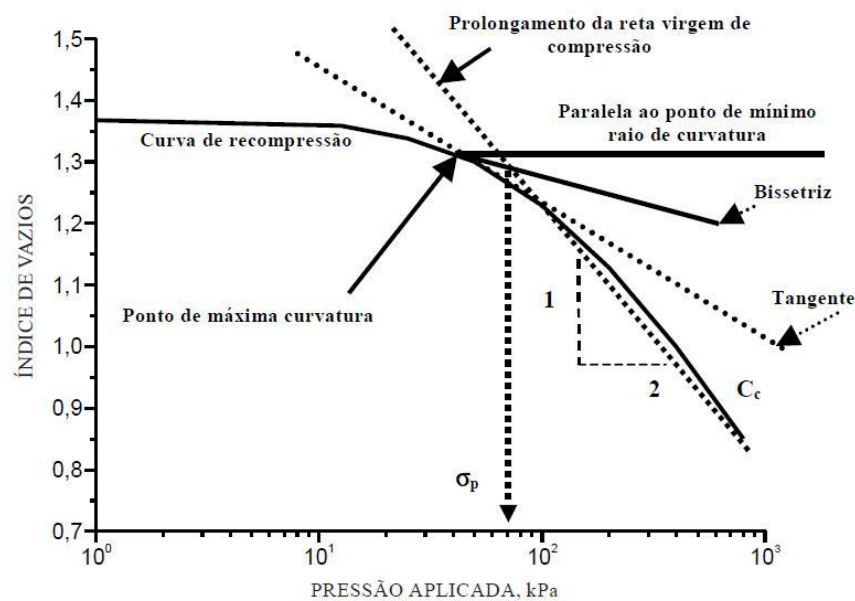


Figura 1. Esquema ilustrativo da determinação da pressão de pré-consolidação obtido da curva de compressão pelo método de Casagrande (SILVA, et al., 2002b).

Nessa curva, identifica-se o ponto cujo raio de curvatura é mínimo e, por ele, traçam-se uma paralela ao eixo das abscissas e uma tangente à curva. Do ângulo formado entre essas duas retas, traça-se a bissetriz. A abscissa do ponto de intercessão da bissetriz com o prolongamento da reta virgem corresponde à σ_p (CASAGRANDE, 1936).

No teste de compressão uniaxial, quanto maior a deformação total da amostra, mais suscetível à compactação é o solo e, sua capacidade de suporte de carga é menor (SUZUKI et al., 2008). A curva obtida nesse tipo de ensaio é dividida em dois segmentos pela σ_p : um denominado curva de compressão secundária, em

que as deformações são elásticas (reversíveis); e outro chamado de reta de compressão virgem, em que as deformações correspondentes são plásticas (irreversíveis) (DEBIASI et al., 2008). Por isso, o entendimento do comportamento compressivo do solo utilizando as curvas de compressão assume importância em razão de que as mesmas são a base, do ponto de vista físico, para a tomada de decisão do manejo mais adequado e a possibilidade de redução dos efeitos prejudiciais originados pelo processo de compactação do solo (ASSIS; LANÇAS, 2005).

A região da curva de compressão secundária, também denominada de recompressão, pode ser utilizada para determinar o momento adequado em que o solo deve ser mobilizado ou trafegado, sem que ocorra compactação adicional (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996), pois é este componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999). Assim, a maior pressão que pode ser aplicada ao solo a fim de evitar a sua compactação é a σ_p (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; ALAKUKU et al., 2003). Entretanto, dados provenientes de experimentos com tráfego de máquinas mostram que deformações plásticas ocorrem mesmo se a σ_p não for excedida (KELLER et al. 2004).

2.2 Efeito das propriedades do solo na capacidade de suporte de carga

A densidade do solo (D_s), o teor de argila e o conteúdo de água são propriedades do solo que influenciam de forma direta o comportamento da pressão de preconsolidação (σ_p).

Em solos argilosos e, ou, mais densos, há maior força de fricção e de coesão, proveniente da maior ligação existente entre as partículas, tornando os valores de σ_p maiores (IMHOFF, 2002). Da mesma forma, a menor susceptibilidade à compactação pode estar associada ao elevado estado de compactação, a qual resulta em menor deformação adicional quando altas pressões (superiores à σ_p) são aplicadas ao solo (KELLER; ARVIDSSON, 2007; SUZUKI et al., 2008).

A σ_p diminui de acordo com o incremento do conteúdo de água do solo, pois o aumento da espessura do filme de água que envolve as partículas reduz a coesão e o atrito entre elas (IMHOFF, 2002). Por isso, a umidade do solo deve ser

considerada na tomada de decisão para realizar as operações de preparo do solo, tratos culturais, colheita e transporte (REICHERT et al., 2007), tendo em vista que a aplicação de pressão ao solo por meio de operações agrícolas, quando o conteúdo de umidade for impróprio, proporcionará efeitos negativos nas propriedades físicas do solo (BOENI, 2000; KLEIN et al., 2008).

Ao estudarem um Latossolo Vermelho-Escuro e um Argissolo Vermelho-Amarelo, Silva et al. (2000) verificaram que a σ_p teve relação linear com a umidade do solo para graus de saturação em água elevados no Latossolo e em grau de saturação intermediário para o Argissolo. Porém esses autores assinalaram que outras propriedades do solo, além da umidade e da densidade, poderiam estar interferindo no resultado devido ao baixo coeficiente de determinação obtido (0,32 para Latossolo e 0,28 para Argissolo).

A σ_p , em Latossolo Vermelho Distrófico e em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico submetidos ao sistema plantio direto e ao sistema convencional, variou com o sistema de manejo do solo utilizado em um estudo realizado por Silva et al. (2002a). A σ_p aumentou de forma exponencial com o aumento da D_s , de acordo com a classe de grau de saturação definida.

A necessidade de um monitoramento da umidade do solo na tomada de decisão da entrada de máquinas em áreas agrícolas foi também constatada por Oliveira et al. (2003). Os autores observaram, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa, que maiores umidades e porosidades proporcionam maiores deformações no teste de compressão uniaxial. Em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiro, Silva et al. (2006) observaram redução da σ_p na estação chuvosa em relação à seca, o que comprova menor capacidade de suporte de carga com o aumento do conteúdo de água do solo.

A relação entre σ_p com o teor de argila e, principalmente, com o teor de matéria orgânica, mesmo que amplamente investigada, ainda parece contraditória. Segundo Horn e Lebert (1994), a distribuição do tamanho de partículas determina como ocorre o seu rearranjo quando a força é aplicada e, a partir disso, o grau de compactação e, conseqüentemente, a suscetibilidade do solo à deformação. Porém, os resultados encontrados por alguns autores indicam que a σ_p aumenta com o aumento do conteúdo de argila (IMHOFF et al., 2004; GREGORY et al., 2006), já para outros (SALIRE et al., 1994; KELLER; ARVIDSSON, 2007), não há correlação entre estas variáveis.

Para Zhang et al. (1997), a suscetibilidade do solo à compactação diminui com o incremento no teor de matéria orgânica do solo (MOS). Isto está relacionado à redução da faixa de umidade na qual o solo possui propriedades plásticas (McBRIDE; BOBER, 1989). Por isso que Zhang et al. (1997) concluíram que é necessário determinar a influência do teor de MOS na suscetibilidade à compactação para diferentes solos e condições de umidade. Entretanto, Imhoff et al. (2004) não encontraram efeito do teor de MOS na σ_p .

O teor de MOS, mesmo afetando a resistência do solo a degradação, possui mecanismos bastante complexos. À medida que a MOS aumenta a estabilidade de agregados e a resistência mecânica do solo à deformação, ela reduz a densidade e aumenta a retenção de umidade, os quais reduzem a resistência do solo à deformação (EKWUE, 1990).

Analisando uma faixa de solos brasileiros bastante intemperizados, Ajayi et al. (2009a, b) encontraram que a σ_p foi influenciada pela densidade e textura do solo, na qual foi associada com a mineralogia da fração argila.

Dessa forma, a caracterização do processo de compressão visa contribuir para definir ações do manejo que evitem ou minimizem a degradação da qualidade física dos solos e a modelagem da pressão de preconsolidação tem apresentado potencialidade para descrição e entendimento dos processos que envolvem a compressão e a compactação do solo.

2.3 Modelagem da pressão de preconsolidação

A estimativa da capacidade de suporte de carga do solo por meio da curva de compressão e da determinação da σ_p é uma tarefa onerosa. Em busca de métodos simplificados para determinar a σ_p , tem-se utilizado funções que descrevem a relação entre propriedades ou indicadores de qualidade do solo (geralmente de difícil medida) e suas propriedades de fácil mensuração (BOUMA, 1989), denominadas de Funções de Pedotransferência (FPT).

A distribuição do tamanho de partículas, a densidade do solo, o teor de matéria orgânica, a umidade e o teor de alguns componentes da fração argila são

algumas das propriedades do solo mais utilizados para gerar FPTs (WöSTEN et al., 2001).

Uma FPT não linear para determinar a pressão máxima que o solo pode suportar sem sofrer compactação adicional, baseando-se em diferentes teores de água, foi desenvolvida por Dias Junior e Pierce (1995). Kondo (1998), utilizando a mesma FPT em Latossolos, demonstrou que a compressibilidade é influenciada também pela densidade do solo resultante de diferentes sistemas de manejo, como culturas anuais em sistema convencional, pastagem perene e mata nativa.

FPTs para estimar a pressão de preconsolidação (σ_p) foram testadas por Silva et al. (2000), em dois tipos de solos e manejos. Os autores concluíram que existe dependência da densidade inicial e do grau de saturação de água na compressibilidade do solo. Imhoff et al. (2004), utilizando amostras de Latossolos com ampla variação textural em uma topossequência sob cultivo de cana de açúcar, também apresentaram um modelo que incorpora o efeito do teor de água, argila e densidade na σ_p do solo.

Considerando que a σ_p é uma estimativa razoável da capacidade de suporte de carga em solos agrícolas mecanizados, a utilização de FPTs que estimem a σ_p pode auxiliar na escolha de máquinas e o momento adequado para o tráfego, a fim de não comprometer a qualidade estrutural de solos agrícolas (MOSADDEGHI et al., 2003).

Dentro desse contexto, tem-se procurado incentivar estudos que contemplem o desenvolvimento de FPTs da capacidade de suporte de carga das diferentes classes de solo, de acordo com a história de seu manejo e do conteúdo de água do solo (OLIVEIRA et al., 2011; PIRES et al., 2012).

2.4 Modelagem da curva de compressão

Muitos pesquisadores utilizam a pressão de preconsolidação (σ_p) como uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF et al., 2004; RÜCKNAGEL et al., 2007). Contudo, tem-se intensificado a busca por melhores formas de obtenção da σ_p , levando alguns pesquisadores a

proporem diferentes métodos de ajuste da curva de compressão (DIAS JÚNIOR; PIERCE; 1995; IMHOFF et al., 2004; GREGORY et al., 2006).

Estudos sobre as diferenças existentes entre os métodos de ajuste da curva de compressão e obtenção da σ_p foram desenvolvidos por Dias Júnior e Pierce (1995), Arvidsson e Keller (2004), Baumgartl e Köck (2004), Gregory et al. (2006) e Cavalieri et al. (2008).

As estimativas da σ_p sofrem interferência de acordo com o tipo de solo, tornando alguns métodos mais propícios que outros para determinada situação, como mencionado por Gregory et al. (2006), no qual, para solos com baixos conteúdos de argila, um modelo polinomial para ajustar a curva de compressão e estimar a σ_p foi menos preciso.

Fritton (2001)[1] e Assouline (2002)[2] propõem equações não-lineares para ajustar a curva de compressão do solo. Equações essas que, segundo os autores, proporcionam maior flexibilidade no ajuste. As equações são exemplificadas abaixo:

$$\rho = \rho_{\max} - (\rho_{\max} - \rho_0) \left\{ 1 + [a(\sigma + 1)]^b \right\}^{-c} \quad [1]$$

$$\rho = \rho_0 + (\rho_{\max} - \rho_0) \left(1 - e^{-(a\sigma)^b} \right) \quad [2]$$

em que: ρ é a densidade final do solo (g cm^{-3}), σ é a carga aplicada, ρ_0 é a densidade inicial do solo (para $\sigma = 0$), ρ_{\max} é a densidade máxima do solo (estimada para Assouline, 2002; e a densidade de partículas para Fritton, 2001); a, b e c são coeficientes de ajustes dos modelos.

Considerar a densidade de partículas como a máxima densidade do solo (FRITTON, 2001), mesmo se forem aplicadas pressões elevadas, parece ser um erro conceitual, uma vez que mesmo na máxima densidade que o solo pode atingir, permanecem espaços vazios que não são preenchidos pelas partículas (BAUMGARTL; KÖCK, 2004).

Os valores de σ_p provenientes de diferentes métodos de ajuste da curva de compressão foram significativamente diferentes entre si, além de fraca correlação ($r^2 = 0,20$) entre a σ_p e outras propriedades do solo (densidade do solo, conteúdo de areia e conteúdo de matéria orgânica) em um estudo realizado por Cavalieri (2007).

De acordo com a autora, o método usado para ajustar a σ_p deve ser cuidadosamente escolhido, uma vez que superestimativas e subestimativas podem ocorrer quando se usam diferentes métodos, tornando muito difícil o uso de um valor absoluto de σ_p como um limite às pressões exercidas no solo a fim de evitar a compactação do mesmo.

Outra característica da curva de compressão é a forma como ocorre a transição da parte elástica da curva para a parte plástica. Em muitos casos, observa-se uma transição muito gradual o que compromete a determinação do ponto de máxima curvatura e conseqüentemente de um valor de σ_p para muitos modelos (ARVIDSSON; KELLER, 2004; BAUMGARTL; KÖCK, 2004).

Uma transição gradual da parte elástica da curva para a parte plástica acontece porque existem diferentes tipos de contatos entre as partículas: sob compressão, os pontos de contato mais fracos se rompem primeiro, seguido pela falha das próximas ligações mais fracas e assim sucessivamente (BERLI et al., 2003). Por isso, a curvatura na transição entre a curva de recompressão e a reta virgem de compressão é afetada pela estrutura do solo, pois, mesmo que a forma e o tamanho das unidades estruturais (textura) não se alterem, uma simples mudança na sua disposição, com conseqüente alteração no espaço poroso, determinará novo comportamento dos processos que ocorrem dentro do solo (FERREIRA, 2010).

Outro problema que pode ocorrer é que quando uma determinada equação é ajustada aos dados experimentais, por exemplo, a equação de van Genuchten (1980), o ponto de máxima curvatura (PMC) pode estar fora da faixa de medida dos dados (GREGORY et al., 2006; CAVALIERI et al., 2008; KELLER et al., 2011), dependendo das cargas aplicadas durante os ensaios de compressão.

De acordo com Keller et al. (2011), o PMC é controlado por uma condição de contorno determinada pelo índice de vazios inicial do solo, sendo esta propriedade a que mais influencia nas propriedades compressivas do solo.

Além disso, seguindo o conceito de Dexter (1988) da estrutura do solo como uma hierarquia, solos com alto índice de vazios inicial, possuem partículas de alta hierarquia, ligadas de forma bastante fraca, o que confere ao solo uma fraca resistência à deformação mesmo quando pequenas pressões são aplicadas, podendo nestas amostras não ocorrer um PMC e, conseqüentemente, um valor de σ_p .

Keller et al. (2011) também questiona o uso de $\log \sigma$ para analisar a curva de compressão, originalmente introduzido por Casagrande (1936), à medida que um diagrama ε - $\log \sigma$ é conveniente, pois o comportamento compressivo de uma amostra pode ser modelado por 2 linhas: a curva de recompressão e a reta virgem de compressão, sendo este o comportamento expresso na maioria dos ensaios de compressão, mas que exclui solos com pequena elasticidade e elevada plasticidade.

Nesse contexto, Keller et al. (2011) criaram um conjunto de dados artificiais onde a taxa de vazios decresce linearmente com a σ , representando um material cuja deformação apresenta um comportamento linear. Dessa forma, verificaram que o uso da escala de estresse logarítmico pode gerar uma má interpretação do resultado. Apesar de ser possível calcular o PMC e conseqüentemente a σ_p em qualquer amostra, analisando a curva de compressão de outra forma, tem-se uma “distorção” do comportamento real do solo, visto que o uso de $\log \sigma$ (ao invés de σ) força a curva de compressão a dobrar a um certo valor de \log , sendo esta dobra, conseqüentemente associada a σ_p .

Uma técnica matemática simples foi sugerida por Dias Junior e Pierce (1995) como alternativa para definir a σ_p sem a necessidade de definir o PMC. A σ_p é definida como o valor de σ na intersecção da reta virgem com a reta de compressão secundária, a qual é traçada sobre os dois, três ou mais primeiros pares de dados do teste. Técnica simples também foi proposta por Arvidsson e Keller (2004), que sugerem definir a σ_p no ponto de intersecção da reta virgem com a reta horizontal traçada a partir da carga zero. Estes e outros métodos de obtenção da σ_p foram testados por Rosa et al. (2011), os quais obtiveram valores significativamente diferenciados.

Mesmo ao utilizar um único modelo para descrever os resultados da curva de compressão, algumas possibilidades de variação do mesmo modelo podem ocorrer. Diferenças em valores estimados, omitidos ou utilizados no modelo para o ajuste acontecem, porém, há uma pequena preocupação nas discussões em artigos científicos sobre a origem dos resultados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A parte experimental de campo foi realizada na estação experimental do Instituto Regional de Desenvolvimento Rural (IRDeR), pertencente à Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), situada no município de Augusto Pestana, Rio Grande do Sul. A área está situada nas coordenadas: 28° 27' 17" de latitude Sul e 53° 54' 50" de longitude Oeste, com a altitude aproximada de 448 m.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico (SANTOS et al., 2006), cuja a análise granulométrica indicou textura argilosa, com 0,12, 0,24 e 0,64 kg kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente. A classe de solo foi selecionada devido à sua representatividade nas áreas sob plantio direto do estado do RS e pela estrutura experimental disponível no local.

Nessa área havia um experimento cujos tratamentos eram três diferentes níveis de compactação. Os níveis de compactação foram constituídos pela condição atual da área sob plantio direto (PD), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto com compactação adicional por tráfego (PDC), gerando, dessa forma, variação nos atributos físicos densidade do solo (Ds) e macroporosidade (Ma).

A escarificação foi realizada na profundidade teórica de trabalho de 0,30m de profundidade (Figura 2a), com um escarificador de sete hastes, espaçadas em 0,37 m. No momento da operação, o solo encontrava-se com um teor de água de 0,27 kg kg⁻¹. A compactação adicional foi promovida por três passadas de um trator MF 292 (Figura 2b), com massa total aproximada de 4510 kg (informações do catálogo). A compactação foi realizada de modo que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si, executando passadas sobrepostas às anteriores, para que toda a área fosse igualmente trafegada. O teor médio de água no solo no momento da compactação era de 0,29 kg kg⁻¹, umidade esta que coincide com o teor médio de água para o PD na capacidade de campo.



Figura 2 - Escarificação-PDE (a) e compactação adicional-PDC (b) (Fotos: Paulo Ivonir Gubiani, 2010).

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em anéis metálicos de 0,061 m de diâmetro de 0,03 m de altura, no período entre agosto e dezembro de 2011. Em cada tratamento, coletaram-se aproximadamente 100 amostras, na camada de 0,06 a 0,08 m da superfície do solo, totalizando 300 amostras. Optou-se por esta camada, pois a mesma sofreu as maiores modificações pela aplicação de compactação adicional.

Posteriormente, as amostras foram levadas ao Laboratório de Física do Solo (LAFis) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). No laboratório, as amostras foram preparadas buscando-se ajustar a quantidade de solo ao volume do anel e fixou-se um disco de pano na base do anel por meio de atilho de borracha. Então, as amostras foram saturadas por capilaridade, durante 24 horas, pesadas e submetidas à tensão de 6 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) até estabelecer um equilíbrio entre a tensão de água retida na amostra e a tensão aplicada. O conteúdo de água retida na amostra nessa tensão representa a microporosidade do solo.

Posteriormente, as amostras obtidas em áreas sob PD, PDE e PDC foram subdivididas em sete grupos e aplicaram-se as tensões de 1, 6, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa, a fim de obter-se variação no conteúdo de água. As tensões de 1, 6 e 10 kPa foram aplicadas em uma coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) e as

tensões de 33, 100, 500 e 1500 kPa em câmara de pressão de Richards (KLUTE, 1986).

Após o estabelecimento do equilíbrio em cada tensão, as amostras foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, segundo a norma NBR-12007/90 (ABNT, 1990), com alteração no tempo de aplicação das cargas utilizando-se um consolidômetro, modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises) com indicador digital da carga aplicada e leitura analógica da deformação da amostra (Figura 3).



Figura 3 - Consolidômetro, modelo S-450 Terraload (DurhamGeo-Interprises) com indicador digital da carga aplicada e leitura analógica da deformação da amostra.

Em cada amostra, foram aplicadas cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa. O tempo de aplicação da carga foi de cinco minutos, pois cerca de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo (SILVA et al., 2000). Após a realização do ensaio, as amostras foram levadas para estufa e mantidas a 105 °C até atingirem peso constante, sendo novamente pesadas, para determinar a densidade do solo (BLAKE; HARTGE, 1986).

A densidade do solo foi definida pela massa do solo seco em estufa dividida pelo volume dos anéis. A porosidade total foi calculada subtraindo-se o peso do solo saturado pelo peso do solo seco em estufa. A macroporosidade, por sua vez, foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 1997).

A densidade do solo antes do teste de compressão foi definida como a densidade do solo inicial. O índice de vazios (ε) foi determinado para cada amostra, baseando-se na expressão proposta por McBride e Joosse (1996) (Equação 3).

$$\varepsilon = D_p/D_s - 1 \quad (3)$$

em que: D_s é a densidade do solo, D_p é a densidade de partículas (determinada conforme Gubiani et al., 2006).

A curva de compressão do solo, que representa graficamente a relação entre o ε ou D_s e o logaritmo (base 10) da pressão aplicada (kPa), foi construída para cada amostra. A σ_p do solo foi calculada utilizando-se dez modelos de descrição da curva de compressão (Tabela 1). Sete deles são variações do modelo de van Genuchten (1980), denominados como vG1, vG2, vG3, vG4, vG5, vG6 e vG7. Outros dois foram propostos por Friton (2001) e Assouline (2002), denominadas de Frit e Ass, respectivamente. Ainda, foi utilizado o modelo de Gompertz (1825), adaptado por Gregory et al. (2006) para descrever a curva de compressão, denominado neste trabalho de Gomp.

Tabela 1 – Modelos utilizados descrever os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial.

Modelo	Denominação
$\varepsilon = \varepsilon_{1600} + (\varepsilon_i - \varepsilon_{1600}) \left[1 + (a\sigma)^b \right]^{-c}$	vG1
$\varepsilon = \varepsilon_f + (\varepsilon_i - \varepsilon_f) \left[1 + (a\sigma)^b \right]^{-c}$	vG2
$\varepsilon = \varepsilon_{1600} + (\varepsilon_i - \varepsilon_{1600}) \left[1 + (a\sigma)^b \right]^{-\left[1 - \left(\frac{1}{b} \right) \right]}$	vG3
$\varepsilon = \varepsilon_f + (\varepsilon_i - \varepsilon_f) \left[1 + (a\sigma)^b \right]^{-\left[1 - \left(\frac{1}{b} \right) \right]}$	vG4
$\varepsilon = (\varepsilon_i) \left[1 + (a\sigma)^b \right]^{-c}$	vG5
$\varepsilon = (\varepsilon_i) \left[1 + (a\sigma)^b \right]^{-\left[1 - \left(\frac{1}{b} \right) \right]}$	vG6
$\varepsilon = 0,27 + (\varepsilon_i - 0,27) \left[1 + (a\sigma)^b \right]^{-\left[1 - \left(\frac{1}{b} \right) \right]}$	vG7
$\rho = \rho_p - (\rho_p - \rho_0) \left[1 + (a\sigma)^b \right]^{-c}$	Frit
$\rho = \rho_0 + (\rho_{\max} - \rho_0) \left(1 - e^{-(a\sigma)^b} \right)$	Ass
$\varepsilon = a + c \exp \left[- \exp (b(\text{Log}_{10} \sigma - m)) \right]^{-1}$	Gomp

σ = carga aplicada (kPa); ε = índice de vazios; ε_i = índice de vazios inicial (para $\sigma=0$); ε_{1600} = índice de vazios na última carga do teste; ρ = densidade final do solo (g cm^{-3}); ρ_0 é a densidade inicial do solo (para $\sigma=0$), ρ_p é a densidade de partículas do solo ε_f , ρ_{\max} , a, b, c e m são coeficientes de ajuste dos modelos.

Nas equações vG5 e vG6, $\varepsilon_f = 0$ é correspondente à condição de contorno, introduzida por Reinert et al. (2003). Na equação vG7, 0,27 é o valor mínimo de ε que pode ser obtido, sugerido por Baumgartl e Köck (2004).

Na equação Frit, o termo $\sigma+1$ presente na equação original (Equação 1, p. 24) foi substituído por σ , conforme sugerem Assouline (2002) e Friton (2006).

Os modelos foram ajustados nas 300 curvas obtidas do ensaio de compressão, utilizando-se o método de Marquardt, com o auxílio do software SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

A fim de se obter a σ_p por meios estritamente matemáticos e retirar a subjetividade inerente ao método gráfico de Casagrande, determinaram-se matematicamente o ponto de máxima curvatura (PMC) e o ponto de inflexão (PI) para todos os métodos de ajuste. Para isso, determinou-se a primeira e segunda derivadas das funções $\varepsilon = f(\sigma)$ e $\rho = f(\sigma)$. O PMC existirá se a segunda derivada ($d^2\varepsilon/d\sigma^2$) da curva de compressão ajustada tiver um ponto de mínimo e o PI existirá

se $d^2\varepsilon/d\sigma^2=0$, que coincide com um ponto de mínimo da $d\varepsilon/d\sigma'$ (BAUMGARTL; KÖCK, 2004) (Figura 4).

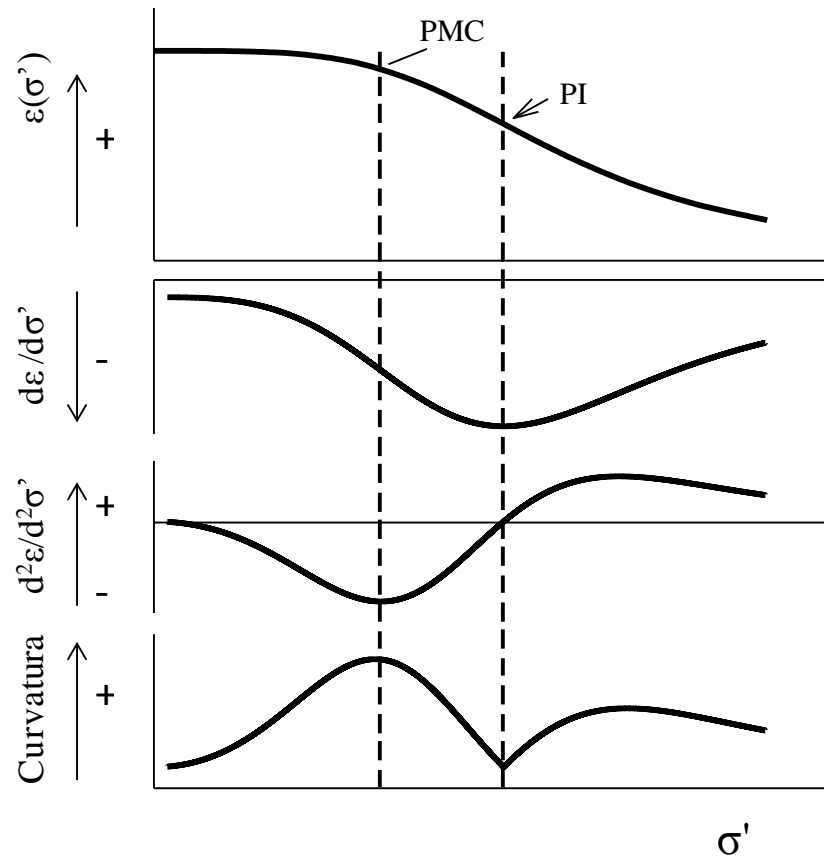


Figura 4 - Características da primeira ($d\varepsilon/d\sigma'$) e segunda derivadas ($d^2\varepsilon/d\sigma'^2$) e da curvatura (C) da função de compressão $\varepsilon = f(\sigma')$, $\{\sigma' = \text{Log}_{10}\sigma\}$, que possibilitam calcular objetivamente o ponto de máxima curvatura (PMC) e o ponto de inflexão (PI). (Paulo Ivonir Gubiani, informações não publicadas)

A equação que descreve a curvatura (C) de $f(\sigma)$ em qualquer valor de σ pode ser calculada pela equação 4 (GREGORY et al. 2006) e ilustra a importância da primeira e segunda derivadas para calcular objetivamente o PMC e o PI.

$$C = \left| \frac{d^2\varepsilon/d\sigma^2}{\left[1 + (d\varepsilon/d\sigma)^2\right]^{3/2}} \right| \quad (4)$$

em que: C = curvatura da função $f(\sigma)$; $d\varepsilon/d\sigma$ = primeira derivada da função $f(\sigma)$; $d^2\varepsilon/d\sigma^2$ = segunda derivada da função $f(\sigma)$

A primeira e segunda derivadas foram aproximadas numericamente por diferenças finitas centradas, a partir da expansão da Série de Taylor (CHAPRA; CANALE, 2008), de acordo com as equações 5 e 6.

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{f(\sigma_i + h) - f(\sigma_i - h)}{2h} \quad (5)$$

$$\frac{d^2\varepsilon}{d\sigma^2} = \frac{f(\sigma_i + h) - 2f(\sigma_i) + f(\sigma_i - h)}{h^2} \quad (6)$$

em que: o valor de h (passo) foi estabelecido como 0,0001 e o intervalo de σ foi definido como 1 a 1600. O mesmo procedimento foi utilizado para os modelos cuja variável dependente foi a densidade. Um algoritmo em Visual Basic for Application foi desenvolvido em planilha eletrônica Excel® para execução dos cálculos (Paulo Ivonir Gubiani, informações não publicadas).

Com os valores da primeira e segunda derivadas foi calculada a curvatura C, utilizando-se a equação descrita anteriormente. O PMC e o PI foram determinados pelo mesmo algoritmo de cálculo das derivadas. A partir do menor valor de σ , o algoritmo analisa a curva C (Figura 4) a procura do maior valor (PMC) antes do ponto de inflexão, definindo o valor de σ no PMC (σ_{PMC}). A partir do PMC, o algoritmo procura o menor valor de C (PI).

Com a σ_{PMC} e a $d\varepsilon/d\sigma$ no PI, a σ_p foi calculada com o procedimento de Casagrande. A reta virgem (RV) foi traçada passando pelo PI, com declividade definida pela $d\varepsilon/d\sigma$ no PI. A reta bissetriz foi traçada a partir do PMC, dividindo ao meio o ângulo formado entre a reta tangente no PMC e a reta paralela à abscissa, traçada a partir do PMC (GREGORY et al., 2006). A σ_p foi definida como o valor de σ na intersecção da RV com a reta bissetriz.

A influência do conteúdo volumétrico de água, da densidade e da macroporosidade do solo na pressão de preconsolidação produzida pelos diferentes modelos, foi quantificada utilizando-se modificações dos modelos propostos por Imhoff et al. (2004) (Equação 7 e 8) e por Busscher (1990) (Equação 9), por meio de técnicas de regressão utilizando-se o software SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

$$\sigma_p = a + b \times D_s + c \times \theta + d \times Ma \quad (7)$$

$$\sigma_p = a + b \times D_s + c \times \theta \quad (8)$$

$$\sigma_p = a \times D_s^b \times \theta^c \quad (9)$$

onde: σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); D_s = densidade do solo (g cm^{-3}); θ = conteúdo de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ma = macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); **a**, **b**, **c** e **d** são coeficientes de ajuste dos modelos.

A partir da criação de funções de pedotransferência, se algum modelo resultar valores de σ_p que representem a capacidade de suporte de carga do solo, então a σ_p proporcionada pelo uso deste modelo deve ser uma função da densidade e conteúdo de água, pois estas últimas são as principais variáveis que determinam a deformação do solo com pequena variabilidade em outras variáveis que também afetam a deformação, como granulometria e matéria orgânica, mantidas constantes neste estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade do solo (D_s) das amostras utilizadas nos ensaios de compressão uniaxial variou de 0,89 a 1,62 g cm^{-3} , a macroporosidade (Ma) variou de 0,02 a 0,35 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e o conteúdo volumétrico de água (θ) variou de 0,17 a 0,49 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (Tabela 2).

Tabela 2 – Parâmetros estatísticos para os valores de densidade do solo, macroporosidade e conteúdo volumétrico de água em 300 amostras utilizadas em ensaios de compressão uniaxial.

	D_s	Ma	θ
	g cm^{-3}		$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
Mínimo	0,89	0,02	0,17
Máximo	1,62	0,35	0,49
Média	1,28	0,14	0,35
DP	0,15	0,08	0,07
CV (%)	11,4	55,2	19,5

D_s = densidade do solo (g cm^{-3}); Ma = macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ = conteúdo volumétrico de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

Os modelos utilizados para descrever a curva de compressão se ajustaram a uma quantidade diferente de curvas. A diferença no número de ajustes se deve ao fato de que o método iterativo de Marquardt falhou na convergência para a soma de quadrado dos resíduos mínima, mesmo estabelecendo-se um número de iterações igual a 1000 e efetuando-se modificações dos valores iniciais dos parâmetros de ajuste.

Dentre as variações do modelo de van Genuchten, as opções vG3, vG6, e vG7 se ajustaram às 300 curvas. Nas demais opções do modelo de van Genuchten o número de ajustes variou de 288 a 298 e está representado entre parênteses para cada opção: vG4 (298), vG1 (297), vG5 (290) e vG2,(288). O modelo Ass se ajustou a 281 curvas e o modelo Gomp se ajustou a 288 curvas. O modelo Frit foi o que ajustou o menor número de curvas (228).

Contudo, nem todos os casos em que houve ajuste dos modelos aos dados medidos possibilitaram obter a σ (Tabela 3). A estratégia de modelagem da curva de compressão utilizada neste trabalho é estritamente matemática, a fim de eliminar subjetividade dos métodos gráficos visuais. A determinação matemática do PMC e

do PI exige que a primeira e segunda derivadas da curva de compressão apresentem determinadas características (Figura 4). O PMC existirá se for possível determinar o ponto mínimo da curva da segunda derivada ($d^2\varepsilon/d\sigma^2$) da função da curva de compressão ajustada e o PI existirá se a segunda derivada for zero, o que coincide com um ponto mínimo da primeira derivada. Nas curvas onde não foi possível determinar o PMC, a σ_p não pode ser determinada e, por isso, a curva foi desconsiderada. Nas curvas onde não foi possível obter o PI, a reta virgem foi traçada passando pelo ponto da última carga do teste, com declividade definida pela $d\varepsilon/d\sigma$ neste ponto (GREGORY, et al., 2006). Isso aconteceu para os modelos vG1, vG2, vG4, vG5, vG6, Frit, e Ass, respectivamente 2, 27, 4, 69, 6, 72 e 24 vezes. Nos modelos vG3, vG7 e Gomp essa condição não foi encontrada nenhuma vez.

Dentre as variações do modelo de van Genuchten, as opções vG1, vG3, vG4, vG6 e vG7 possibilitaram a obtenção da σ_p para todas aquelas curvas na qual os modelos foram ajustados. As opções vG2 e vG5 possibilitaram a obtenção da σ_p para um menor número de curvas (respectivamente 269 e 288). O modelo Ass possibilitou a obtenção da σ_p em 248 curvas e o modelo Gomp em 186. O modelo Frit possibilitou a obtenção da σ_p em apenas 169 curvas.

Os modelos utilizados para descrever a curva de compressão provocaram variações expressivas nos valores mínimos, médio e, sobretudo, nos valores máximos de σ_p obtida (Tabela 3). Além disso, raramente os mínimos e os máximos ocorreram na mesma curva.

Tabela 3 - Pressão de preconsolidação (kPa) Mínima, Máxima e Média para os diferentes modelos testados.

Modelo	σ_p Mínima	σ_p Máxima	σ_p Média	n
vG1	1,92 (B)	736,42 (L)	151,26	297
vG2	1,98 (C)	1128,59 (M)	183,74	269
vG3	1,11 (A)	361,69 (J)	90,01	300
vG4	1,60 (D)	611,86 (J)	114,34	298
vG5	1,86 (E)	1312,56 (N)	213,65	288
vG6	1,34 (F)	611,86 (J)	116,25	300
vG7	1,28 (G)	384,21 (O)	103,37	300
Frit	1,58 (H)	1363,15 (P)	299,58	169
Ass	1,79 (I)	1243,77 (Q)	261,63	248
Gomp	1,66 (A)	1245,57 (J)	195,26	186

σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); Letras entre parênteses representam a identificação da amostra na qual se obteve o resultado. n = número de amostras onde se obteve a σ_p .

Para os casos em que houve ajuste, e nos quais foi possível obter a σ_p (Tabela 3), a maioria dos modelos apresentou valores altos para o coeficiente de determinação (R^2) (Figura 5). Os menores valores de R^2 foram obtidos nos modelos vG2 (0,65) e Frit (0,02). Para os demais modelos, os valores mínimos de R^2 foram superiores a 0,87. Com exceção dos modelos Frit e vG3, mais de 95% dos valores de R^2 obtidos com o uso dos diferentes modelos foi superior a 0,95. O modelo vG3 apresentou R^2 superior a 0,90 em 98% dos casos e o modelo Frit em 88% das curvas.

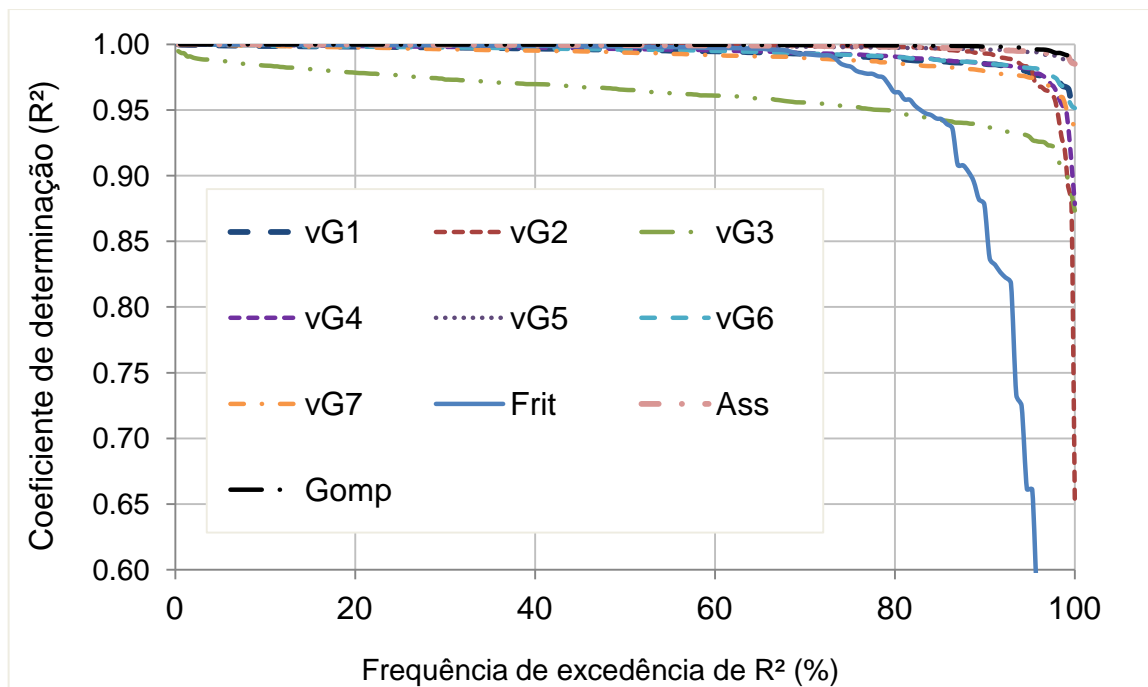


Figura 5 - Distribuição de frequência acumulada de coeficientes de determinação (R^2) para os diferentes modelos testados.

Contudo, mesmo que inferior aos demais, a qualidade de ajuste do modelo Frit foi boa (R^2), porém, o modelo possibilitou a obtenção da σ_p em uma quantidade menor de amostras (169). Assim, muitas curvas de compressão descritas pelo modelo Frit não apresentaram as propriedades matemáticas [ponto mínimo da curva da segunda derivada da função $\rho = f(\sigma)$ para calcular PMC] necessárias para se obter a σ_p pelo procedimento de Casagrande. Desempenho um pouco melhor em relação ao modelo Frit foi verificado para os modelos Ass e Gomp (σ_p obtida em 248 e 186 curvas, respectivamente), mantidos valores altos de R^2 .

Além de possibilitarem a determinação da σ_p em um maior número de curvas, as variações do modelo de van Genuchten possuem R^2 maior. A escolha do modelo de van Genuchten implica na hipótese que existe a transição entre as regiões elásticas e plásticas da curva de compressão o que possibilita a identificação do PMC para um número maior de curvas. Diferentemente, os modelos Ass e, principalmente os modelos Gomp e Frit, com os quais foi possível obter a σ_p para 83%, 62% e 56 % dos ensaios realizados, respectivamente, satisfazem menos vezes a hipótese acima.

Porém, fica também evidente que as variações do modelo de van Genuchten implicam tanto em número diferente de curvas das quais é possível obter a σ_p como diferentes valores para a σ_p numa mesma amostra de solo. Por exemplo, a equação que relaciona $vG6$ com $vG4$ indica boa associação dos valores de σ_p , cujo R^2 foi 0,90 (Figura 6; Tabela 4). Nos demais casos, o R^2 não passou de 0,37. Contudo, essas diferenças devido a variações de uso do modelo de van Genuchten não têm sido discutidas em trabalhos que utilizam este modelo (CAVALIERI et al, 2008; ROSA et al., 2011) e comprometem a comparação da σ_p quando as publicações não explicitam a maneira como o modelo foi ajustado aos dados.

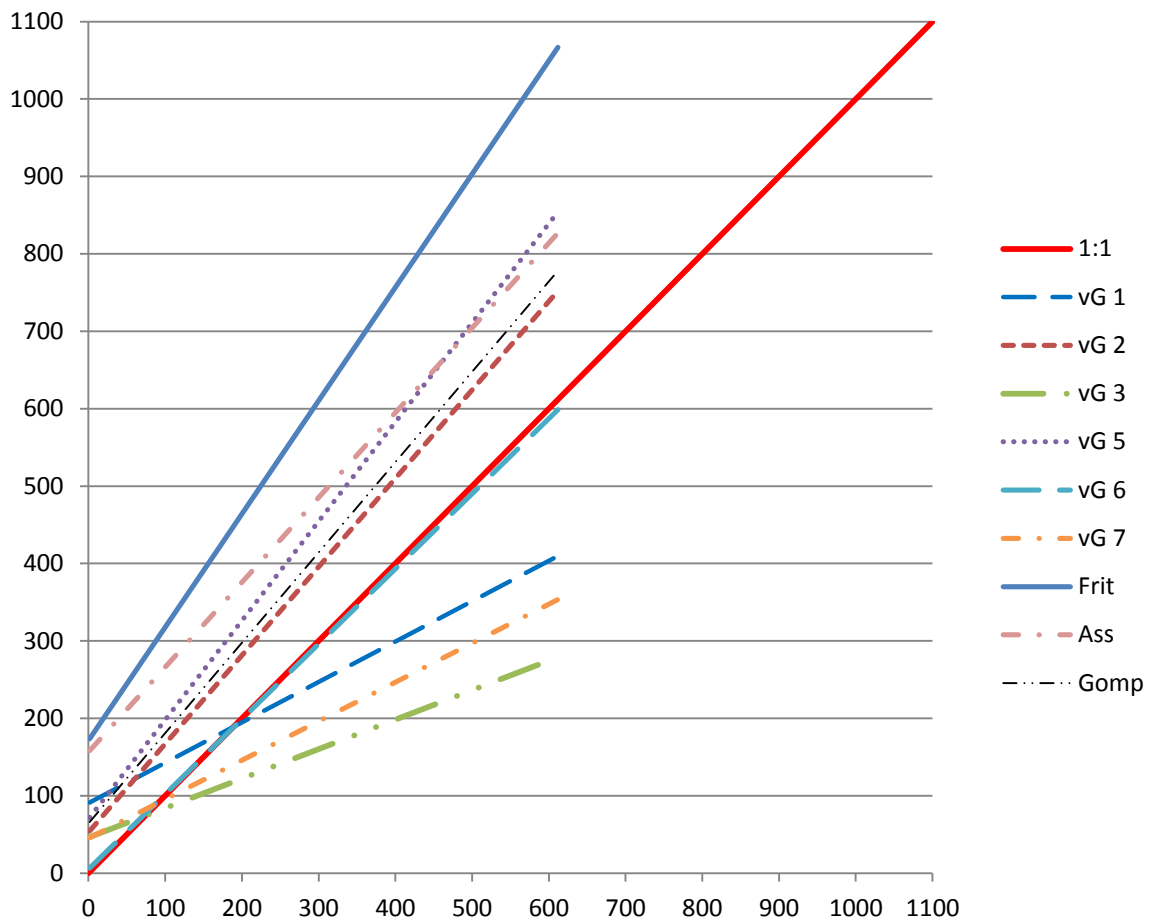


Figura 6 - Comparação entre os diferentes modelos testados utilizando como referência o modelo vG 4 (Relação 1:1).

As diferenças na σ_p entre os modelos Frit, Ass e Gomp em relação ao modelo vG4 também são grandes (Tabela 4). Os R^2 das demais relações variaram de 0,10 (Ass) a 0,45 (Gomp), o que demonstra a grande divergência de resultados de σ_p devido ao modelo que se utiliza para descrever a curva de compressão. A escolha do modelo vG4 como referência de comparação dos demais modelos se deu apenas devido ao seu bom desempenho (bom número de ajustes e de obtenção da σ_p) e por estimar o índice de vazios final (ε_f) (Tabela 1), o que evita restrições constantes impostas pelo usuário que podem ter pouco significado físico (restrições presentes nos modelos vG1, vG3, vG5, vG6 e vG7).

Tabela 4 - Relação existente entre a pressão de preconsolidação (σ_p) resultante da utilização de diferentes modelos e a σ_p produzida com o uso do modelo vG4.

Modelo	$\sigma_{p \text{ Modelo}} = a \times \sigma_{p \text{ vG4}} + b$	R ²
vG1	$\sigma_{p \text{ vG1}} = 0,5216 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 90,465$	0,22
vG2	$\sigma_{p \text{ vG2}} = 1,1426 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 52,890$	0,36
vG3	$\sigma_{p \text{ vG3}} = 0,3804 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 46,217$	0,34
vG5	$\sigma_{p \text{ vG5}} = 1,2817 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 69,952$	0,24
vG6	$\sigma_{p \text{ vG6}} = 0,9697 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 5,1873$	0,90
vG7	$\sigma_{p \text{ vG7}} = 0,5043 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 44,886$	0,37
Frit	$\sigma_{p \text{ Frit}} = 1,4637 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 171,340$	0,11
Ass	$\sigma_{p \text{ Ass}} = 0,6931 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 186,660$	0,10
Gomp	$\sigma_{p \text{ Gomp}} = 1,1666 \times \sigma_{p \text{ vG4}} + 64,187$	0,45

R² = 1 - (SQR/SQT), em que SQR = soma de quadrados dos resíduos e SQT = soma de quadrados total.

O maior R² produzido pela relação vG6 versus vG4 (0,90) decorre do fato desses dois modelos se diferenciarem apenas na definição do ε_f . No modelo vG4, o ε_f é estimado no procedimento de ajuste e, no modelo vG6, o ε_f é fixado igual a zero (Tabela 1). A boa relação entre vG4 e vG6 indica que a condição de contorno $\varepsilon_f = 0$, no modelo vG6, embora seja um artifício de ajuste deste modelo e não tenha sentido físico, altera pouco o resultado em relação ao vG4. Isso se deve ao fato que o valor zero para ε_f é o resultado na maioria dos ajustes do modelo vG4.

O valor dos coeficientes a e b das equações lineares $\sigma_{p \text{ modelo}} = a \times \sigma_{p \text{ vG4}} + b$ determina a região de $\sigma_{p \text{ vG4}}$ em que a σ_p estimada pelos demais modelos é maior ou menor que a $\sigma_{p \text{ vG4}}$. Como o intercepto (coeficiente b) é maior que zero e o coeficiente angular (coeficiente a) é maior que um para as equações dos modelos vG2, vG5, Frit e Gomp (Tabela 4), esses modelos sempre superestimaram a σ_p em relação a $\sigma_{p \text{ vG4}}$ (Figura 6), e os modelos Frit e vG5 são os que mais superestimaram. Diferentemente, os modelos vG1, vG3 e vG7 superestimaram a σ_p até valores de $\sigma_{p \text{ vG4}}$ num intervalo de 100 a 200 kPa e, acima desse intervalo, sempre subestimaram a $\sigma_{p \text{ vG4}}$. O modelo vG3 foi o que mais subestimou a σ_p .

As diferenças entre os valores encontrados aumentam substancialmente a partir de $\sigma_{p \text{ vG4}}$ maiores que 200 kPa (Figura 6), para a maioria dos modelos, exceto para o modelo vG6.

Variabilidade nos valores de σ_p também foi encontrada por Cavalieri et al. (2008), utilizando cinco diferentes métodos para ajuste (dois modelos e três procedimentos na curva de compressão). Os dados deste trabalho concordam com os daqueles autores e informam que as diferenças na σ_p são maiores quanto maior a densidade do solo. Assim, a alteração na estimativa da σ_p provocada pelos modelos implica que o uso da σ_p como critério de definição de tráfego pode não evitar a compactação do solo, o que reforça o argumento de Keller et al. (2011) sobre os efeitos de artifícios matemáticos na determinação da σ_p e questionam a validade desta propriedade como uma estimativa da capacidade de suporte de carga real do solo.

O desvio padrão, calculado para os valores de σ_p de cada amostra (σ_p dos 10 modelos testados), para as 101 curvas nas quais todos os modelos se ajustaram (34 % das 300 curvas do estudo), indica que a variabilidade obtida na σ_p produzida pelos modelos é grande ao ponto de a média de σ_p menos um desvio padrão resultar em um valor negativo para muitas curvas (Figura 7).

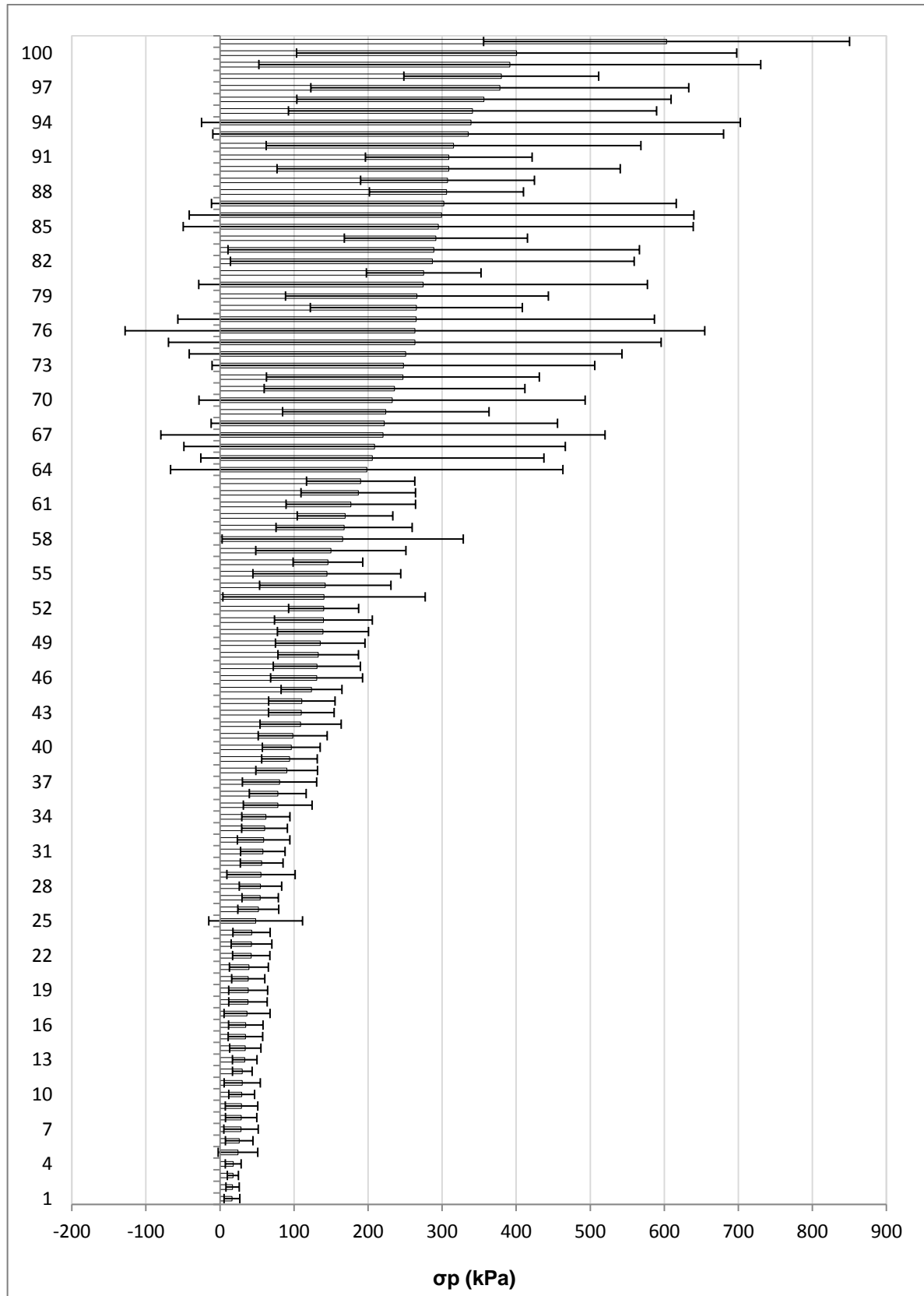


Figura 7 - Média e desvio padrão da σ_p de 101 curvas onde foi possível calcular a σ_p nos dez diferentes modelos testados (vG1, vG2, vG3, vG4, vG5, vG6, vG7, Frit, Ass e Gomp).

Embora isso seja efeito de falta de aderência à distribuição normal dos 10 valores que compõem cada conjunto de dados, do qual foi calculado a média e o desvio padrão, a variabilidade causada na σ_p pelos diferentes métodos de descrição da curva de compressão é tamanha ao ponto de comprometer a confiabilidade da σ_p para representar a capacidade de suporte de carga do solo. Em termos práticos, os desvios em relação à média da capacidade de suporte de carga do solo não podem ser inferiores a zero. Porém, mesmo que maiores que zero, não deveriam ser tão grande como as diferenças na σ_p calculada pelos diferentes modelos.

Os resultados deste trabalho agregam evidências aos estudos de Keller et al. (2004), Gregory et al. (2006) e Cavalieri et al. (2008), sobre a inconsistência da σ_p como um indicador para o manejo do solos agrícolas e apontam para necessidade de validar as medidas mecânicas do solo em testes laboratoriais com estudos do comportamento do solo no campo. Cavalieri et al. (2008) relatam que os métodos de determinação da σ_p (modelos e procedimentos) alteraram significativamente os valores encontrados para um mesmo ensaio de compressão e enfatizam que a compactação do solo pode não ser evitada ou mesmo ser superestimada, dependendo da escolha da forma de obtenção da σ_p .

Da mesma forma, Gregory et al. (2006) também ajustaram os dados obtidos em ensaios de compressão a três diferentes modelos (polinomial de quarta ordem, sigmoidal logística simétrica e equação sigmoidal de Gompertz assimétrica) e calculou a σ_p de acordo com três diferentes métodos. Os autores, assim como neste trabalho, descrevem valores diferenciados de σ_p , de acordo com o modelo utilizado, e principalmente segundo o método utilizado, o que destaca a importância de investigar um modelo ou método de ajuste capaz de vincular seus resultados com estudos do comportamento do solo no campo.

Nesse contexto, Keller et al. (2004) compararam a σ_p do ensaio de compressão uniaxial com a σ_p de um teste de campo de aprofundamento de uma placa (placa sinkage) (DAWIDOWSKI et al., 2001) determinadas por dois procedimentos (Casagrande e intersecção da linha de recompressão com a reta virgem de compressão) e vincularam esses resultados com a deformação proveniente de experimentos de rodagem. Os autores não encontraram nenhuma relação clara entre os métodos utilizados. Contudo, a σ_p do método de campo comparada com a σ_p do oedômetro não foi diferente, independente dos mecanismos envolvidos em cada teste. Porém, nenhum valor de σ_p limitou a deformação no

campo, mesmo quando a pressão aplicada foi muito inferior a σ_p . Por isso, aqueles autores também assinalam a urgente necessidade de estudar o comportamento do solo no campo e vincular essas experiências para a mecânica do solo em testes laboratoriais.

Entretanto, mesmo que tenha havido grande variabilidade na σ_p provocada pelos diferentes modelos, se algum desses resulta σ_p que represente a capacidade de suporte de carga do solo, então a σ_p proporcionada pelo uso de determinado modelo deve ser uma função da densidade e conteúdo de água (Tabelas 5 e 6). Estrutura e água são as principais variáveis que determinam a deformação de uma matriz de solo com pequena variabilidade em outras variáveis que também afetam a deformação (SILVA et al., 2002a,b; IMHOFF et al., 2004), como granulometria e matéria orgânica, uniformes neste estudo. Como a densidade do solo (D_s) é um parâmetro que reflete primariamente o arranjo das partículas do solo (estrutura do solo), que, por sua vez define as características do sistema poroso, qualquer manifestação que possa influenciar a disposição das partículas do solo refletirá diretamente na D_s (FERREIRA, 2010).

Tabela 5 - Equações oriundas de diferentes modelos de descrição da curva de compressão para estimar a pressão de preconsolidação em função da densidade do solo (D_s) e conteúdo volumétrico de água (θ), segundo modelo adaptado de Imhoff et al.(2004).

Modelo	$\sigma_p = a + b \times D_s + c \times \theta$	n	R ²
vG 1	$\sigma_p = -159,89 + 531,33 \times D_s - 960,01 \times \theta$	297	0,49
vG 2	$\sigma_p = -418,32 + 1113,29 \times D_s - 2200,82 \times \theta$	269	0,50
vG 3	$\sigma_p = -96,73 + 304,92 \times D_s - 543,22 \times \theta$	300	0,42
vG 4	$\sigma_p = -207,63 + 511,75 \times D_s - 897,09 \times \theta$	298	0,45
vG 5	$\sigma_p = -690,99 + 1501,56 \times D_s - 2735,43 \times \theta$	288	0,46
vG 6	$\sigma_p = -216,69 + 526,09 \times D_s - 916,00 \times \theta$	300	0,48
vG 7	$\sigma_p = -159,13 + 429,13 \times D_s - 769,97 \times \theta$	300	0,47
Frit	$\sigma_p = -1406,64 + 1863,47 \times D_s - 1453,09 \times \theta$	169	0,35
Ass	$\sigma_p = -245,39 + 945,38 \times D_s - 1807,47 \times \theta$	248	0,29
Gomp	$\sigma_p = -547,96 + 1173,36 \times D_s - 1966,46 \times \theta$	186	0,49

σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); D_s = densidade do solo (g cm^{-3}), θ = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); R^2 = coeficiente de determinação da equação ajustado; n = número de pares de dados utilizado para gerar a equação.

Com o uso do modelo adaptado de Imhoff et al.(2004), não mais que 50% (R^2 máximo igual a 0,50) da variação na σ_p obtida a partir de qualquer modelo pode ser explicada pela densidade e conteúdo de água (Tabela 5). Isso indica um baixo grau de confiabilidade na estimativa da mesma quando utilizadas apenas essas propriedades. Com exceção de Frit (0,35) e Ass (0,29), o R^2 obtido de todos os outros modelos testados foi próximo, variando entre 0,42 (vG3) e 0,50 (vG2), mesmo que os parâmetros estimados “a”, “b” e “c” possuam grande diferença.

Tabela 6 - Equações oriundas de diferentes modelos de ajuste da curva de compressão para estimar a pressão de preconsolidação em função da densidade do solo (D_s) e conteúdo volumétrico de água (θ), segundo modelo adaptado de Busscher (1990).

Modelo	$\sigma_p = a \times D_s^b \times \theta^c$	n	R^2
vG 1	$\sigma_p = 15,13 \times D_s^{2,9127} \times \theta^{-1,646}$	297	0,46
vG 2	$\sigma_p = 2,52 \times D_s^{5,3003} \times \theta^{-2,9425}$	269	0,55
vG 3	$\sigma_p = 11,83 \times D_s^{2,837} \times \theta^{-1,368}$	300	0,35
vG 4	$\sigma_p = 8,64 \times D_s^{3,695506} \times \theta^{-1,6911}$	298	0,37
vG 5	$\sigma_p = 5,04 \times D_s^{5,0986} \times \theta^{-2,5147}$	288	0,43
vG 6	$\sigma_p = 8,80 \times D_s^{3,6784} \times \theta^{-1,6972}$	300	0,41
vG 7	$\sigma_p = 8,68 \times D_s^{3,4262} \times \theta^{-1,6571}$	300	0,41
Frit	$\sigma_p = 138,28 \times D_s^{4,1337} \times \theta^{-0,1001}$	169	0,29
Ass	$\sigma_p = 26,8528 \times D_s^{2,7597} \times \theta^{-1,6974}$	248	0,25
Gomp	$\sigma_p = 3,0698 \times D_s^{5,3864} \times \theta^{-2,8623}$	186	0,54

σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); D_s = densidade do solo (g cm^{-3}), θ = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); R^2 = coeficiente de determinação da equação ajustado; n = número de pares de dados utilizado para gerar a equação.

O modelo de Busscher tem seu uso difundido na modelagem da resistência mecânica do solo à penetração (RP) em função da D_s e θ , e neste estudo é mais uma alternativa na busca de uma melhor descrição da variação ocorrida na σ_p em função daquelas propriedades. Seu uso é suportado pela boa relação encontrada entre σ_p e RP (MOSADDEGHI et al., 2003; DIAS JUNIOR et al., 2004; LIMA et al., 2006). Com o uso desse modelo, no máximo 55% das variações ocorridas na σ_p foram explicadas pela variação da densidade e conteúdo de água do solo. O R^2 variou de 0,25 (Ass) até 0,55 (vG2), enquanto que, com o uso do modelo modificado de Imhoff et al. (2004), os valores do R^2 variaram de 0,29 (Ass) a 0,50 (vG2). Entretanto, Severiano et al. (2010) utilizaram o modelo de Busscher e obtiveram R^2

de 0,83 para um modelo da σ_p de um Latossolo Vermelho-Amarelo, porém, mesmo que as amostras tenham sido obtidas de áreas de cana-de-açúcar com colheita manual e mecanizada, a variação no parâmetro D_s foi de 1,29 a 1,37 g cm⁻³, o que exclui do modelo a D_s de uma ampla faixa possível de ser obtida no campo e que poderia alterar os resultados.

Na maioria dos casos, quanto mais resultados de σ_p são obtidos a partir dos diferentes modelos, menor é a relação da σ_p com a D_s e θ , independente do modelo testado (Imhoff ou Busscher), com exceção dos modelos de Frit e Ass. Avaliando estas duas características (R^2 e valores obtidos de σ_p por modelo) não é possível indicar que um modelo é melhor que outro. Dessa forma, o uso dos parâmetros D_s e θ , mesmo que fortemente influenciem a capacidade de suporte de carga do solo, não auxiliou na escolha de um modelo de descrição da curva de compressão.

Pelo fato da D_s e o θ juntos não explicarem mais que 55% da variação da σ_p , foi introduzida a macroporosidade (Ma) no modelo de Imhoff et al. (2004), na tentativa de melhorar a eficiência desse modelo (Tabela 7). Mesmo que esta propriedade não possua medida tão simples como D_s e θ , o que pode desqualificar seu uso para modelagem da σ_p , o mesmo poderia servir para auxiliar na escolha de um modelo de descrição da curva mais adequado, pois, com a variação destes três parâmetros que influenciam a capacidade de suporte de carga do solo, uma FPT da σ_p que se relacione bem com D_s , θ e Ma poderia ser pertinente e sua utilização considerada possível.

Tabela 7 - Equações oriundas de diferentes modelos de ajuste da curva de compressão para estimar a pressão de preconsolidação (σ_p) em função da densidade do solo (D_s), conteúdo volumétrico de água (θ) e macroporosidade do solo (Ma), segundo modelo adaptado de Imhoff et al. (2004).

Modelo	$\sigma_p = a + b \times D_s + c \times U_v + d \times Ma$	n	R ²
vG 1	$\sigma_p = 715,82 + 2,53 \times D_s - 1078,46 \times \theta - 1114,56 \times Ma$	297	0,58
vG 2	$\sigma_p = 798,61 + 375,22 \times D_s - 2365,06 \times \theta - 1523,78 \times Ma$	269	0,54
vG 3	$\sigma_p = 407,64 + 0,34 \times D_s - 612,324 \times \theta - 639,84 \times Ma$	300	0,50
vG 4	$\sigma_p = 505,07 + 77,95 \times D_s - 985,38 \times \theta - 898,22 \times Ma$	298	0,51
vG 5	$\sigma_p = 710,15 + 651,23 \times D_s - 2915,02 \times \theta - 1768,45 \times Ma$	288	0,48
vG 6	$\sigma_p = 500,30 + 93,12 \times D_s - 1014,24 \times \theta - 909,56 \times Ma$	300	0,54
vG 7	$\sigma_p = 466,07 + 51,59 \times D_s - 855,64 \times \theta - 793,12 \times Ma$	300	0,54
Frit	$\sigma_p = -207,72 + 1166,77 \times D_s - 1713,23 \times \theta - 1497,73 \times Ma$	169	0,36
Ass	$\sigma_p = 1197,04 + 92,56 \times D_s - 2080,38 \times \theta - 1782,64 \times Ma$	248	0,33
Gomp	$\sigma_p = 403,63 + 585,73 \times D_s - 2050,11 \times \theta - 1179,62 \times Ma$	186	0,52

σ_p = pressão de preconsolidação (kPa), D_s = densidade do solo (g cm^{-3}), θ = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e Ma = macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); R² = coeficiente de determinação da equação ajustado; n = número de pares de dados utilizado para gerar a equação.

Com exceção do modelo vG2, os outros nove modelos geram resultados de σ_p que se correlacionam melhor com D_s , θ e Ma , do que apenas com os dois primeiros parâmetros. Porém, mesmo que a introdução da Ma na FPT da σ_p melhore o desempenho dessas funções, o R² permanece baixo ($\leq 0,58$).

Valores baixos de R² para FPT da σ_p também foram encontrados por Silva et al. (2002b), Imhoff et al. (2004) e Cavalieri (2007). Valores de R² superiores a 0,80 foram obtidos por Kondo e Dias Junior (1999), Oliveira et al. (2011) e Pires et al. (2012). Contudo, estes últimos propõem FPTs da σ_p para diferentes solos apenas em função do conteúdo de água do solo para diferentes sistemas de produção e manejo. Isso torna homogêneo o parâmetro D_s , pois a mesma não varia mais do que $0,10 \text{ g cm}^{-3}$ naqueles estudos.

Neste estudo, constatou-se que houve uma grande variação no número de curvas onde foi possível obter a σ_p por meios estritamente matemáticos. Entretanto, nesses casos, a qualidade do ajuste é boa (elevado R²). Os modelos de Gompertz e Friton são os que possibilitaram a determinação da σ_p para um menor número de curvas e os modelos vG3, vG6 e vG7, os mais aptos a determinar a σ_p para a totalidade das curvas.

Porém, a variação da σ_p produzida pelas diferentes opções de descrição da curva de compressão é grande ao ponto de comprometer o significado físico da σ_p para representar a capacidade de suporte de carga do solo. Da mesma forma, D_s , θ e M_a , mesmo que influenciem a capacidade de suporte de carga do solo, não explicaram mais que 58% da variação da σ_p produzida com o uso de diferentes modelos.

Por isso, com os critérios utilizados, não foi possível eleger um modelo em relação aos demais que possibilite estimar de maneira mais adequada, através da σ_p , a capacidade de suporte de carga do solo.

4.1 Estudo exploratório com ênfase na deformação do solo

Pelo fato da σ_p ter relação fraca com a D_s , θ e M_a , foi investigado se alguma outra informação proveniente das curvas de compressão estaria melhor relacionada com D_s e θ . Para isso foi estudada a relação entre a porcentagem de deformação da amostra em função das cargas aplicadas, e como essa informação percentual poderia ser explicada pela D_s e θ .

A deformação do solo tem uma relação direta com a porosidade total do solo, especialmente a macroporosidade, indicando que a diminuição da macroporosidade e porosidade total é diretamente proporcional à deformação do solo (SILVA et al., 2000). Dessa forma, um índice de tolerância de deformação que garanta que a porosidade do solo não seja comprometida pode ser útil para estudar o efeito da aplicação de pressões no solo.

Valores de porosidade de aeração (P_a) menores que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ são considerados prejudiciais ao desenvolvimento de plantas, devido à redução na difusão de oxigênio para o sistema radicular (GRABLE; SIEMER, 1968; REICHERT, et al., 2007). Assim, a deformação do solo poderia ser tolerada enquanto a macroporosidade for maior que 10%, que seria um limite seguro, pois, na maior parte do tempo ao longo do ciclo das culturas, a porosidade livre de água é maior que a macroporosidade, principalmente nas camadas superficiais (KAISER, 2010).

O efeito da diminuição do índice de vazios na macroporosidade para a faixa de densidade verificada no solo deste experimento foi investigado (Tabela 8). Em

cada densidade, foi calculado o índice de vazios inicial (ϵ_i) pela equação $\epsilon = [(D_p/D_s)-1]$, em que D_p é a densidade de partículas do solo estudado ($D_p = 2,72 \text{ g cm}^{-3}$). A partir do ϵ_i , foram calculados os valores de ϵ correspondentes a 90, 80 e 70 % do ϵ_i , os quais são representados, respectivamente, por $\epsilon_{90\%}$, $\epsilon_{80\%}$ e $\epsilon_{70\%}$. Com esses novos valores de ϵ e rearranjando a equação acima, foram calculadas as $D_{s90\%}$, $D_{s80\%}$ e $D_{s70\%}$, que correspondem a D_s quando o ϵ do solo é, respectivamente, $\epsilon_{90\%}$, $\epsilon_{80\%}$ e $\epsilon_{70\%}$.

A partir das medições de densidade (g cm^{-3}) e macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) deste estudo (300 amostras), obteve-se a equação $Ma = 0,57 D_s^2 - 1,93 D_s + 1,67$ ($R^2 = 0,91$; $p < 0,001$), que possibilita estimar a macroporosidade em função da densidade com boa precisão. Com essa equação, foram calculados os valores de Ma para a $D_{s90\%}$, $D_{s80\%}$ e $D_{s70\%}$, que corresponde a macroporosidade para $\epsilon_{90\%}$, $\epsilon_{80\%}$ e $\epsilon_{70\%}$, respectivamente. Dessa forma têm-se os valores de $Ma_{90\%}$, $Ma_{80\%}$ e $Ma_{70\%}$ (Tabela 8 e Figura 8).

Tabela 8 - Efeito da diminuição do índice de vazios na macroporosidade para a faixa de densidade verificada no solo deste experimento.

D_{s_i}	ϵ_i	$\epsilon_{90\%}$	$\epsilon_{80\%}$	$\epsilon_{70\%}$	$D_{s90\%}$	$D_{s80\%}$	$D_{s70\%}$	$Ma_{90\%}$	$Ma_{80\%}$	$Ma_{70\%}$
1,00	1,72	1,55	1,38	1,20	1,07	1,14	1,23	0,255	0,205	0,154
1,05	1,59	1,43	1,27	1,11	1,12	1,20	1,29	0,221	0,174	0,128
1,10	1,47	1,33	1,18	1,03	1,17	1,25	1,34	0,190	0,146	0,105
1,15	1,37	1,23	1,09	0,96	1,22	1,30	1,39	0,161	0,122	0,084
1,20	1,27	1,14	1,01	0,89	1,27	1,35	1,44	0,135	0,100	0,067
1,25	1,18	1,06	0,94	0,82	1,32	1,40	1,49	0,112	0,081	0,053
1,30	1,09	0,98	0,87	0,76	1,37	1,45	1,54	0,092	0,064	0,041
1,35	1,01	0,91	0,81	0,71	1,42	1,50	1,59	0,074	0,051	0,032
1,40	0,94	0,85	0,75	0,66	1,47	1,55	1,64	0,059	0,039	0,026
1,45	0,88	0,79	0,70	0,61	1,52	1,60	1,69	0,046	0,031	0,021
1,50	0,81	0,73	0,65	0,57	1,57	1,65	1,73	0,036	0,025	0,019
1,55	0,75	0,68	0,60	0,53	1,62	1,70	1,78	0,028	0,021	0,018

D_{s_i} = densidade do solo inicial (g cm^{-3}), ϵ_i = índice de vazios inicial; $\epsilon_{90\%}$, $\epsilon_{80\%}$ e $\epsilon_{70\%}$ = 90, 80 e 70% do índice de vazios inicial, respectivamente; $D_{s90\%}$, $D_{s80\%}$ e $D_{s70\%}$ = D_s quando o índice de vazio é 90, 80 e 70% do índice de vazios inicial, respectivamente; $Ma_{90\%}$, $Ma_{80\%}$ e $Ma_{70\%}$ = macroporosidade do solo quando o índice de vazio inicial é 90, 80 e 70% do índice de vazios inicial ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente.

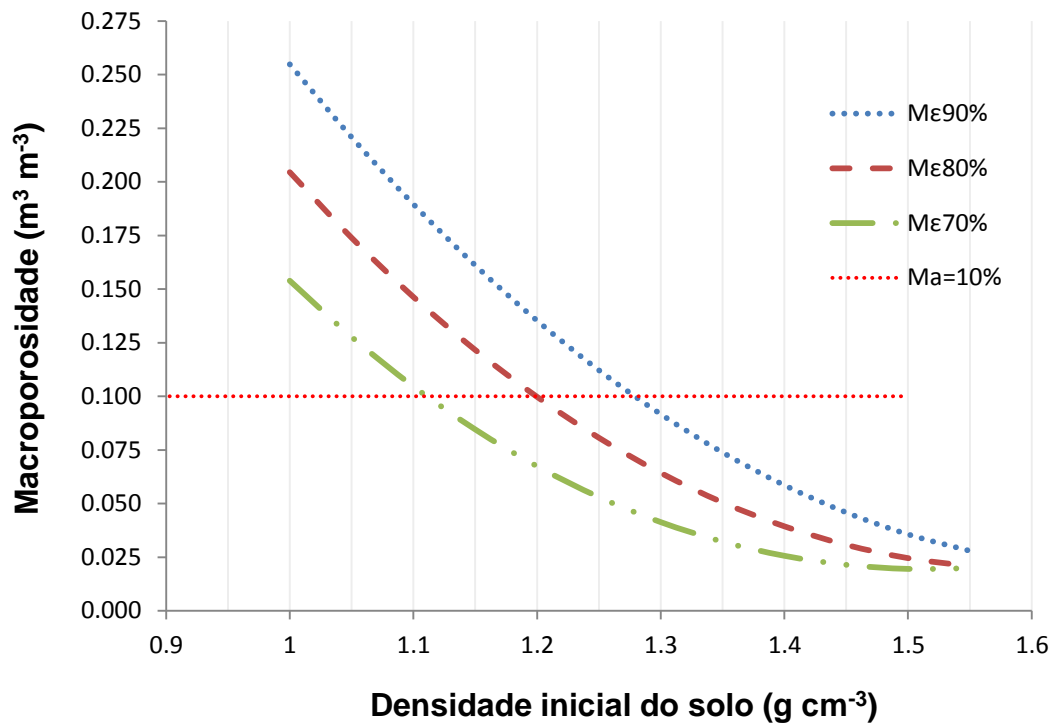


Figura 8 - Variação da macroporosidade (M_a) com a densidade do solo (D_s) resultante de deformação tolerada para que sejam mantidos 90%, 80% e 70% do índice de vazios inicial. $M_{\epsilon 90\%}$ = 90% de manutenção do índice de vazios inicial, e assim sucessivamente.

Quando se admite uma deformação do solo de até 30% do ϵ_i , que corresponde a uma manutenção de 70% do ϵ_i , a macroporosidade será menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ se a densidade inicial for maior que $1,10 \text{ g cm}^{-3}$. Dito de outra maneira, se a densidade inicial do solo for menor que $1,10 \text{ g cm}^{-3}$, uma deformação de 30% do ϵ_i (manutenção de 70% do ϵ_i) não faria a macroporosidade ser menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Para deformações de 20% e 10% do ϵ_i (manutenção de 80% e 90% do ϵ_i) as densidades iniciais no limite $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporosidade são $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,28 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Assim, a tolerância à deformação é menor quanto maior a densidade inicial do solo. Também pode ser demonstrado com a equação que estima a macroporosidade em função da densidade que a macroporosidade já seria menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ se a densidade do solo for maior que $1,35 \text{ g cm}^{-3}$. Nesse caso, nenhuma deformação seria tolerada.

O fluxo de água no solo ocorre preferencialmente nos macroporos, havendo assim, correlação entre macroporosidade e condutividade hidráulica (MESQUITA; MORAES, 2004). Quando o solo é compactado, sua resistência mecânica é

aumentada e a porosidade total é reduzida à custa dos poros maiores. Com isso, a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são reduzidas. Conseqüentemente, o escoamento superficial de água pode aumentar e a permeabilidade ao ar pode tornar-se reduzida (REICHERT et al., 2007). Por isso, estudos sobre o efeito da redução do índice de vazios na condutividade hidráulica e na permeabilidade ao ar, mesmo que não sejam o objetivo deste trabalho, são parâmetros que futuramente merecem também ser investigados.

A principal pergunta é se há uma porcentagem de tolerância à deformação que possa ser assumida como limite de deformação independente da densidade do solo? Caso seja possível estabelecer esse limite de deformação, as cargas suportadas pelo solo para que o limite de deformação não seja ultrapassado poderiam ser preditas pela densidade e conteúdo de água com mais precisão que as predições para a pressão de preconsolidação?

No que se refere à primeira pergunta, o comportamento de curvas de compressão para amostras com densidades baixa, média e alta fornecem informações úteis ao serem comparadas com as porcentagens de deformação (Figuras 9 e 10). As densidades das amostras escolhidas estão compreendidas no grupo de amostras com densidades mínimas, médias e máximas, das 300 amostras utilizadas neste estudo. E, a maior densidade utilizada ($1,40 \text{ g cm}^{-3}$) foi semelhante à densidade máxima do solo estimada pela equação sugerida por Klein (2012) [$D_{smax} = -0,0092 * \text{Argila} + 2,0138$ ($r^2=0,92$), com Argila em %], cujo valor é $1,42 \text{ g cm}^{-3}$.

De acordo com as curvas de baixa, média e alta densidade (Figura 9), verifica-se que a manutenção de 90% do ϵ_i corresponde à transição entre comportamento elástico e plástico (em torno do ponto de máxima curvatura), mais deslocado para o plástico na curva de baixa densidade. Por um lado, tolerar 10% de redução do ϵ_i pode tornar a macroporosidade menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em solo com densidade maior que $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 8). Por outro lado, uma parte dessas deformações pode ser recuperada, visto que podem ocorrer ainda na região elástica (Figura 9). Para solos com densidade menor que $1,28 \text{ g cm}^{-3}$, mesmo que as deformações avancem um pouco na região plástica da curva, 10% de redução do ϵ_i não compromete a macroporosidade do solo (Figura 8).

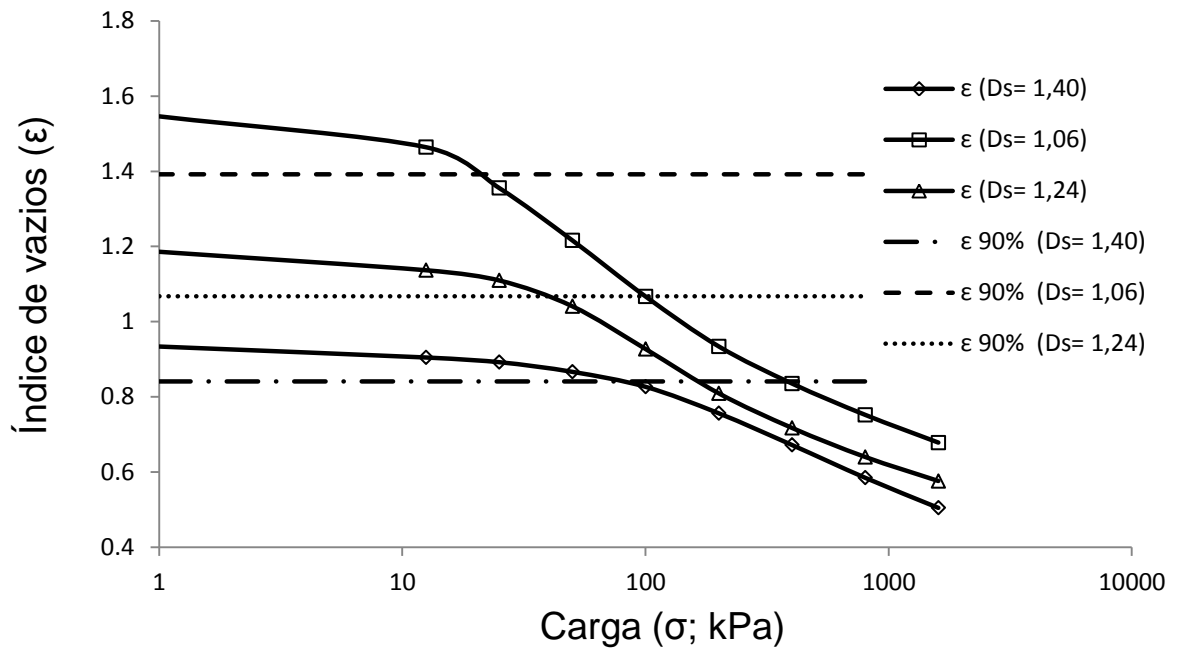


Figura 9 - Curvas de compressão correspondentes a densidades do solo baixa, média e alta (1,06; 1,24 e 1,40 g cm^{-3} , respectivamente) e índice de vazios correspondente ao $\epsilon_{90\%}$ para cada curva (linhas tracejadas).

A manutenção de 80 % do ϵ_i (deformação de 20%) desloca as deformações para a região plástica das curvas de todas as densidades (Figura 10). Mesmo que se optasse por tolerar deformações plásticas, apenas em solos com densidade menor que 1,20 g cm^{-3} a macroporosidade não seria comprometida (Figura 8). Para solos com a estrutura mais comprometida pela compactação (maior densidade), admitir essa deformação seria tolerar uma redução grande na M_a e um aumento de D_s , que pode comprometer o fluxo de ar e água e restringir o crescimento de raízes pelo aumento da resistência mecânica à penetração, diminuindo a qualidade física do solo (SOUZA et al., 2005).

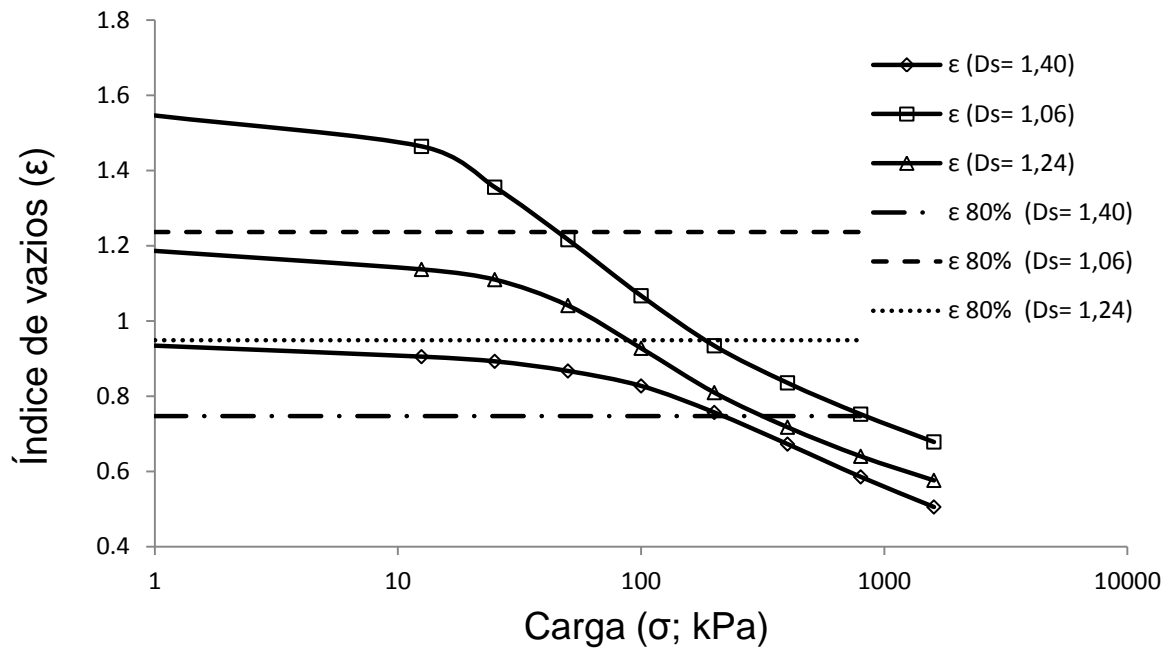


Figura 10 - Curvas de compressão correspondentes a densidades do solo baixa, média e alta (1,06; 1,24 e 1,40 g cm^{-3} , respectivamente) e índice de vazios correspondente ao $\epsilon_{80\%}$ para cada curva (linhas tracejadas).

Verificou-se que a porcentagem de tolerância à deformação que possa ser assumida como limite de deformação independente da densidade do solo é um valor entre 10 e 20% do ϵ_i . Verificou-se também que as cargas para determinada deformação dependem da densidade do solo. Em densidades pequenas, as cargas são pequenas e, em densidades grandes, as cargas são grandes.

Da mesma forma, o conteúdo de água no solo modifica esse comportamento de forma semelhante a que afeta a pressão de preconsolidação (Figura 11). Em conteúdos de água maiores, as cargas são menores, em conteúdos menores, as cargas são maiores. Assim, as cargas para determinada porcentagem de deformação ou manutenção do ϵ_i podem ser função da densidade e conteúdo de água do solo.

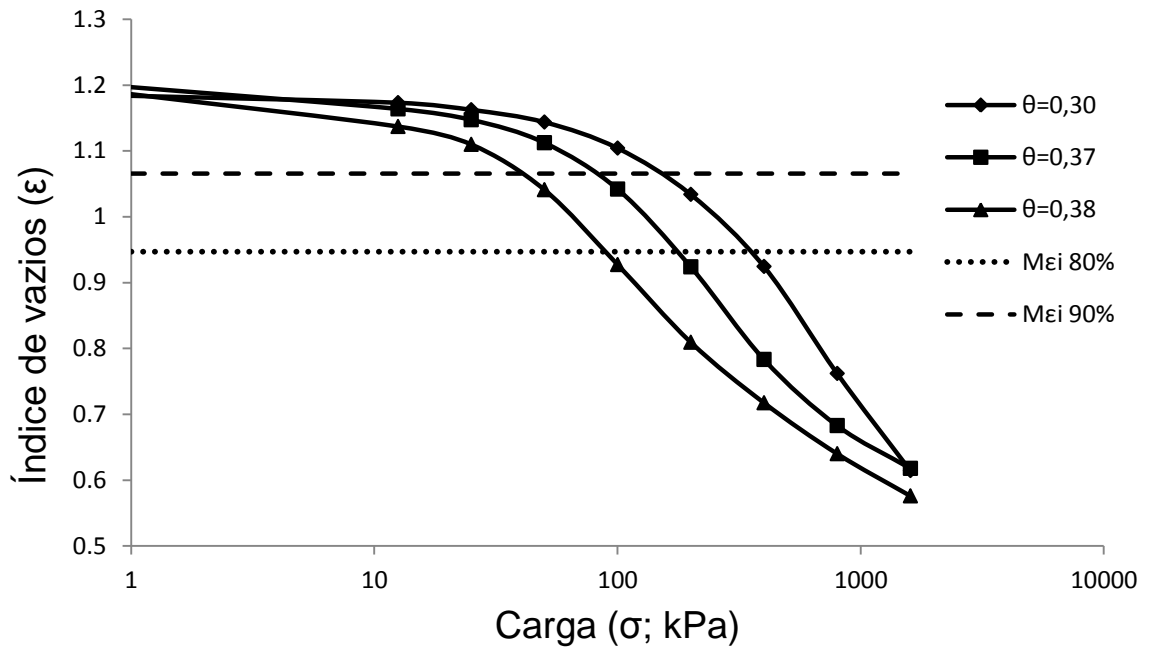


Figura 11 - Curvas de compressão correspondentes a três amostras de solo com densidade igual a $1,24 \text{ g cm}^{-3}$, com diferente conteúdo volumétrico de água ($\theta - \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e manutenção do índice de vazios correspondente a 90 e 80 % do índice de vazios inicial ($M\epsilon_{i90\%}$ e $M\epsilon_{i80\%}$, respectivamente - linhas tracejadas).

Em vista dessa dependência, a resposta para a segunda pergunta pode, também, auxiliar na resposta da primeira. Isto é, a porcentagem de manutenção do ϵ_i acima de 80%, cujas cargas aplicadas indicarem maior dependência da densidade e do conteúdo de água, poderia ser um limite de deformação a ser assumido como crítico.

Para verificar o exposto acima foram seguidas as etapas abaixo, cujos procedimentos são semelhantes aos executados para o ajuste dos modelos às curvas de compressão.

a) Para todas as 300 curvas, o índice de vazios em cada carga foi transformado em porcentagem de manutenção do ϵ_i ;

b) Nas curvas transformadas, foi ajustado o modelo vG4 (Tabela 1). Optou-se por este modelo em razão de seu melhor desempenho e por estimar o ϵ_f , o que evita restrições constantes impostas pelo usuário que podem ter pouco significado físico.

c) Com os parâmetros obtidos no ajuste, foi calculada a carga (σ) para manutenção de 80; 82,5; 85; 87,5; 90; 92,5 e 95 % do ϵ_i . Para a obtenção das cargas, também foi desenvolvido um algoritmo em Visual Basic for Application em

planilha eletrônica Excel® (Paulo Ivonir Gubiani, informações não publicadas) (Figura 12).

d) Utilizando os modelos adaptados de Imhoff et al. (2004) (Equação 7 e 8) e de Busscher (1990) (Equação 9), usadas na pressão de preconsolidação, as cargas correspondentes a cada porcentagem de manutenção do ε_i foram ajustadas em função da densidade e do conteúdo de água, utilizando-se o software SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

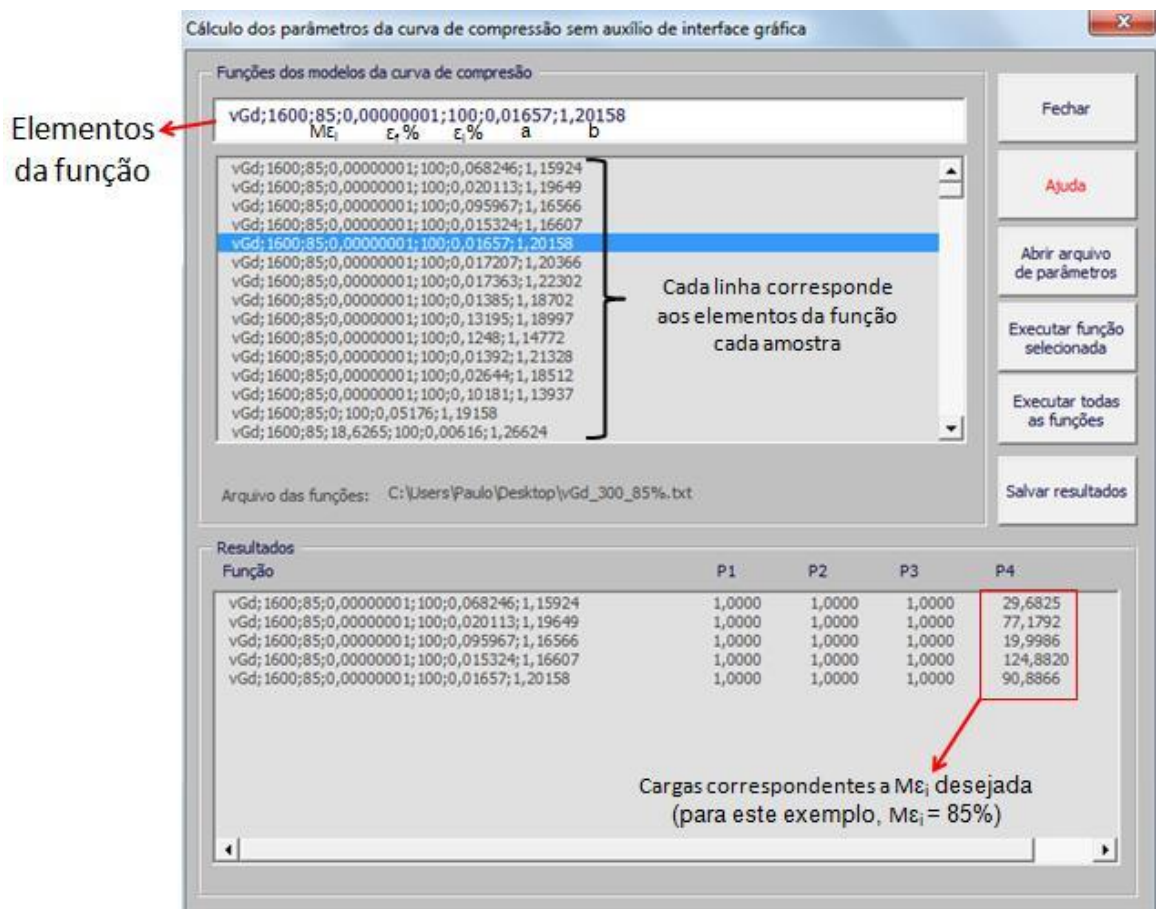


Figura 12 - Algoritmo desenvolvido em Visual Basic for Application em planilha eletrônica Excel® utilizado para execução dos cálculos (Paulo Ivonir Gubiani, informações não publicadas)

Um exemplo de função (função selecionada - Figura 12):

vGd;1600;85;0,00000001;100;0,01657;1,20158

Esta função é interpretada pelo algoritmo para calcular os parâmetros da curva de compressão aplicando o modelo vG4 (Tabela 1). O significado de cada parâmetro [separados por (;)] da função é:

vGd = modelo de van Genuchten para análise da deformação;

1600 = máximo valor para as cargas;

85 = manutenção do índice de vazios final desejado ($M\varepsilon_i$);

0,000000001 = índice de vazios final em % e estimado segundo o modelo (ε_f %);

100= índice de vazios inicial em % (ε_i %);

0,01657 = valor do coeficiente a do modelo;

1,20158 = valor do coeficiente b do modelo.

Os resultados fornecidos na coluna P4 correspondem a σ para a $M\varepsilon_i$ em kPa para cada função. Os resultados obtidos nas colunas P1, P2 e P3 correspondem a outros parâmetros possíveis de serem calculados pelo aplicativo. Quando não solicitado o cálculo, de acordo com os elementos da função, o aplicativo retorna o valor 1,0000 (Figura 12).

O uso da porcentagem de manutenção do ε_i gerou FPTs com ajuste melhor do que aquelas geradas para a pressão de preconsolidação. O R^2 destas funções variou de 0,57 a 0,74 (Tabela 9). Apesar de pequena variação, o R^2 foi maior para as FPTs com o uso do modelo de Busscher, do que quando utilizado o modelo adaptado de Imhoff, exceto para $M\varepsilon_i$ de 95%, onde a diferença do R^2 dos modelos foi de um centésimo.

Tabela 9 - Equações de estimativa da carga (σ) aplicada ao solo para diferentes porcentagens de manutenção do índice de vazio inicial ($M\varepsilon_i$) em função da densidade do solo (D_s) e conteúdo volumétrico de água (θ).

$M\varepsilon_i$ (%)	Modelo		n	R^2
	$\sigma = a + b \times D_s + c \times \theta$ (Imhoff et al., 2004)			
80	$\sigma = -716,44 + 1237,66 \times D_s - 1745,22 \times \theta$		298	0,59
82,5	$\sigma = -607,54 + 1065,29 \times D_s - 1544,32 \times \theta$		298	0,57
85	$\sigma = -542,08 + 975,24 \times D_s - 1503,09 \times \theta$		298	0,58
87,5	$\sigma = -382,03 + 712,73 \times D_s - 1111,55 \times \theta$		298	0,63
90	$\sigma = -307,55 + 572,76 \times D_s - 900,05 \times \theta$		298	0,57
92,5	$\sigma = -192,23 + 380,64 \times D_s - 612,76 \times \theta$		298	0,63
95	$\sigma = -110,26 + 235,18 \times D_s - 390,66 \times \theta$		298	0,63
	$\sigma = a \times D_s^b \times \theta^c$ (Busscher, 1990)			
80	$\sigma = 7,31 \times D_s^{5,27} \times \theta^{-2,0364}$		298	0,62
82,5	$\sigma = 4,72 \times D_s^{5,5562} \times \theta^{-2,1948}$		298	0,62
85	$\sigma = 1,32 \times D_s^{6,5623} \times \theta^{-2,9109}$		298	0,74
87,5	$\sigma = 1,83 \times D_s^{5,8772} \times \theta^{-2,5833}$		298	0,74
90	$\sigma = 1,20 \times D_s^{6,3896} \times \theta^{-2,60}$		298	0,70
92,5	$\sigma = 1,63 \times D_s^{5,4172} \times \theta^{-2,3006}$		298	0,69
95	$\sigma = 1,73 \times D_s^{4,7082} \times \theta^{-2,0730}$		298	0,62

$M\varepsilon_i$ = manutenção do índice de vazio inicial do solo (%); σ = pressão na qual o índice de vazios do solo corresponde a manutenção do índice de vazio proposto (kPa), D_s = densidade do solo (g cm^{-3}), θ = conteúdo volumétrico de água (m m^{-3}); R^2 = coeficiente de determinação da equação ajustado; n = número de pares de dados utilizado para gerar a equação.

Também como realizado para a pressão de preconsolidação, inseriu-se além da D_s e do θ , a M_a do solo nas FPTs, para verificar se ela melhoraria a qualidade do ajuste (Tabela 10).

Tabela 10. Equações de estimativa da carga (σ) aplicada ao solo para diferentes porcentagens de manutenção do índice de vazio inicial ($M\epsilon_i$) em função da densidade do solo (D_s), conteúdo volumétrico de água (θ) e macroporosidade do solo (Ma), usando o modelo adaptado de Imhoff et al.(2004).

$M\epsilon_i$ (%)	$\sigma = a + b \times D_s + c \times \theta + d \times Ma$	n	R^2
80	$\sigma = 153,50 + 712,78 \times D_s - 1866,99 \times \theta - 1102,20 \times Ma$	298	0,62
82,5	$\sigma = 64,18 + 660,00 \times D_s - 1638,34 \times \theta - 851,07 \times Ma$	298	0,58
85	$\sigma = -44,64 + 675,11 \times D_s - 1572,71 \times \theta - 630,25 \times Ma$	298	0,59
87,5	$\sigma = 66,24 + 442,26 \times D_s - 1174,30 \times \theta - 567,94 \times Ma$	298	0,65
90	$\sigma = -21,97 + 400,46 \times D_s - 940,03 \times \theta - 361,82 \times Ma$	298	0,59
92,5	$\sigma = 74,74 + 219,56 \times D_s - 650,13 \times \theta - 338,25 \times Ma$	298	0,65
95	$\sigma = 101,44 + 107,45 \times D_s - 420,30 \times \theta - 268,22 \times Ma$	298	0,66

$M\epsilon_i$ = manutenção do índice de vazio inicial do solo (%); σ = pressão na qual o índice de vazios do solo corresponde a manutenção do índice de vazio proposto (kPa), D_s = densidade do solo ($g\ cm^{-3}$), θ = conteúdo volumétrico de água ($m\ m^{-3}$) e Ma = macroporosidade do solo ($m\ m^{-3}$); R^2 = coeficiente de determinação da equação ajustado; n = número de pares de dados utilizado para gerar a equação.

O uso da Ma juntamente com D_s e o θ , nas FPTs que estimam a carga (σ) para uma determinada $M\epsilon_i$, não melhorou a qualidade do ajuste, resultando em pequena diferença nos coeficientes de determinação (R^2). Dessa forma, a inclusão da Ma nas FPTs, tanto para a σ_p como para a $M\epsilon_i$, não melhora a predição dessas propriedades. Além disso, a determinação da macroporosidade é mais trabalhosa que a determinação da densidade e do conteúdo de água.

As FPTs da σ para $M\epsilon_i$ entre 85 e 87,5%, ajustadas com o modelo de Busscher, resultaram os maiores R^2 (0,74). Esse valor é maior que todos os coeficientes de determinação obtidos para as FPTs da pressão de preconsolidação. Assim, há indicações de que valores de $M\epsilon_i$ entre 85 e 87,5% podem ser utilizados como limites críticos de manutenção da porosidade para não haver degradação da qualidade física do solo. Ainda, diferentemente da pressão de preconsolidação que não é restrita a nenhum nível de degradação da estrutura do solo, a $M\epsilon_i$ é uma variável que garante certo nível de preservação da porosidade e melhor se relacionada com propriedades da estrutura do solo. Portanto, novos estudos nessa abordagem serão úteis para (i) avaliar se as cargas para manutenção de níveis de $M\epsilon_i$ são menos sensíveis que a pressão de preconsolidação aos diferentes modelos de descrição da curva de compressão e (ii) qual delas é uma medida mais associada com capacidade de carga do solo medida no campo.

5. CONCLUSÕES

O modelo de van Genuchten e suas variações se ajustaram a um número maior de curvas e possibilitaram a obtenção da pressão de preconsolidação (σ_p) em mais casos que os demais modelos. Portanto, pelas estratégias estritamente matemáticas usadas neste trabalho, é preferível usar o modelo de van Genuchten. Contudo, a variação da σ_p produzida pelas diferentes opções do modelo de van Genuchten e os demais modelos não possibilitam definir qual o melhor modelo para modelagem da curva de compressão. Da mesma forma, densidade do solo (D_s), conteúdo volumétrico de água (θ) e macroporosidade não explicaram mais que 58% da variação da σ_p produzida com o uso de diferentes modelos. A grande variabilidade da σ_p reforça posições de outros pesquisadores que alertam para a necessidade de validar as medidas mecânicas do solo em testes laboratoriais com estudos do comportamento do solo no campo. As medidas de laboratório são sujeitas a grandes desvios provocados pela escolha do modelo e conduzem a incertezas sobre a validade da σ_p para representar a capacidade de suporte de carga do solo dos solos agrícolas.

O uso do limite de manutenção de 80 % do índice de vazios inicial ($M\varepsilon_i$) desloca as deformações para a região plástica das curvas de todas as faixas de densidade e, por isso, não pode ser utilizado para solos com estrutura mais comprometida pela compactação. A carga para garantir determinada porcentagem de manutenção do índice de vazios inicial ($M\varepsilon_i$) é mais bem explicada que a carga correspondente a σ_p pela variação da D_s e θ . Para os valores de $M\varepsilon_i$ entre 85 e 87,5%, foram obtidos os maiores coeficientes de determinação (ambos 0,74). Por isso, há potencial para a utilização destes valores como limites críticos de manutenção da porosidade sem haver degradação da qualidade física do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**. Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13p.

AJAYI, A. E. et al. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, v.102, p. 14-18. 2009a.

AJAYI, A. E., et al. Strength attributes and compaction susceptibility in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, v.105, p. 122-127. 2009b.

ALAKUKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.145-160, 2003.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. **Soil and Tillage Research**. v.77, p. 85-95, 2004.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 507-514, 2005.

ASSOULINE, S. Modeling soil compaction under uniaxial compression. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, n.6, p.1784-1787, 2002.

BAUMGARTL, T.; KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p. 57–65. 2004.

BERLI, M. et al. Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. **Soil and Tillage Research**, v. 73, p. 57-66. 2003.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, p.363-375. 1986.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 2000. 99f. Dissertação

(Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, 9: 177-213, 1989.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **American Society of Agricultural Engineers**, v.33, p. 519-524, 1990.

CASAGRANDE, A. **Determination of the preconsolidation load and its practical significance**. Proceedings of the International Conference on the Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge. p. 60-64. 1936.

CAVALIERI, K. **Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação e qualidade física do solo**. 2007. 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

CAVALIERI, K. M. V.; et al. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. **Soil and Tillage Research**, v.98, n.1, p.17-26, 2008.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical methods for engineers: with programming and software applications**. 5rded. Boston: WCB/ MacGraw-Hill, 960 p. 2008.

DAWIDOWSKI, J. B. et al. Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v.4, p.1059- 1064, 2001.

DEBIASI, H. et al. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2629-2637, 2008.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v.11, p. 199-238. 1988.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28 p. 805-810, 2004.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182, 1996.

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

EKWUE, E. I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil and Tillage Research**. v.16, p.289-297, 1990.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.

FERREIRA, M. M. Caracterização Física do solo. In: van Lier, Q. J. **Física do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 1-27. 2010.

FRITTON, D. D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.678-684, 2001.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, v.32, p.18-186, 1968.

GREGORY, A. S. et al. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil and Tillage Research**, v.89, n.1, p. 45-57, 2006.

GUBIANI, P. I. et al. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo: exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v.36, n.2, p. 664-668, 2006.

HÅKANSSON, I. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures**. 2005. 153p. Uppsala, Sweden, Department of Soil Sciences, Division of Soil Management, 2005.

HÅKANSSON, I.; MEDVEDEV, V. W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil and Tillage Research**, v.35, p. 85-97, 1995.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R., FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, v. 73, p. 89–99. 2003.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: Soane, B. D.; Ouwerkerk, C. van. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier. 662p. 1994.

IMHOFF, S. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 104f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 11-18, 2001.

IMHOFF, S. et al. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n.1, p. 17–24, 2004.

KAISER, D. R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 150p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

KELLER, T. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, v.163, n.1-2, p.13-23, 2011.

KELLER, T. et al. Soil precompression stress. II. A comparison of different compaction tests and stress – displacement behavior of the soil during wheeling. **Soil and Tillage Research**, v.77, p. 97-108. 2004.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. **European Journal of Soil Science**, v. 58, p. 1373-1381. 2007.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 38, p. 365-371, 2008.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 2. ed. Passo Fundo: EDIUPF, 2012. 240p.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.635-662.

KONDO, M. K.; **Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Lavras, 1998.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 23, p. 211-218, 1999.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v.19 p.275-286, 1991.

LIMA, C. L. R. et al. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1765-1772, 2006.

McBRIDE, R. A.; JOOSSE, P. J. Overconsolidation in agricultural soils. II. Pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.373-380. 1996.

McBRIDE, R. A.; BOBER, M. L. A re-examination of alternative test procedures for soil consistency limit determination: I. A compression-based procedure. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.178-183, 1989.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, p. 963-969, 2004.

MOSADDEGHI, M. R. et al. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in Central Iran. **Soil and Tillage Research**, v.70, p.53-64, 2003.

MOUAZEN, A. M. et al. Two-dimensional prediction of spatial variation in topsoil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content. **Soil and Tillage Research**, v. 74, p. 91-102, 2003.

OLIVEIRA, G. C. et al. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 773-781, 2003.

OLIVEIRA, V. S. et al. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 435-442, 2011.

PIRES, B. S. et al. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 635-642, 2012.

REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.

REINERT, D. J. et al. *COMPRESS* – Software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. Viçosa. **Anais...** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM, 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1931-1935, 2006.

ROSA, D. P. et al. Métodos de obtenção da capacidade de suporte de carga de um argissolo cultivado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1561-1568, 2011.

RÜCKNAGEL, J. et al. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil and Tillage Research**, v. 92, p. 213–220, 2007.

SALIRE, E. V. et al. Compression of intact subsoil under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, v. 31, 235–248. 1994.

SANTOS, H. G. dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. 5.ed. Cary, 1999.

SEVERIANO, E. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.404-413, 2010.

SILVA, A. R. et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 207-216, 2006.

SILVA, R. B.; et al. Alterações de propriedades físicas e hídricas de um Latossolo Vermelho distrófico pela adsorção de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 791-798, 2001.

SILVA, V. R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1-8, 2002b.

SILVA, V. R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 9-15, 2002a.

SILVA, V. R. et al. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. (ed). **Soil compaction in crop production**. Netherlands : Elsevier, p.1-21, 1994.

SOUZA, E. D. et al. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 1135-1139, 2005 .

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade a compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 963-973, 2008.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long – term tillage systems. **Soil and Tillage Research.**, v. 92, p. 104-113, 2007.

WÖSTEN, J. H. M. et al. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v.251, p.123-150, 2001.

ZHANG, H. et al. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.239–245. 1997.