

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Agronomia



Tese

**Capacidade de suporte de um Argissolo sob plantio
direto a partir da Resistência à Penetração e Teor de
Água do Solo**

Roberto Lilles Tavares Machado

Pelotas, 2008

ROBERTO LILLES TAVARES MACHADO

**CAPACIDADE DE SUPORTE DE UM ARGISSOLO
SOB PLANTIO DIRETO A PARTIR DA
RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E TEOR DE
ÁGUA DO SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências (área do conhecimento: Produção Vegetal).

Orientador: Prof. Doutor Ângelo Vieira dos Reis

Co-Orientador: Prof. Doutor Antônio Lilles T. Machado

Pelotas, 2008

Banca examinadora:

Prof. Doutor Ângelo Vieira dos Reis
(Orientador)

Prof. Doutor Airton dos Santos Alonço

Prof. Doutor Carlos Antônio da Costa Tillmann

Prof^a. Doutora Cláudia Fernanda Almeida Teixeira

A minha esposa Rosane e minha filha Rafaela, pelo
apoio, companheirismo, amor e felicidade
que me proporcionam a cada momento
da minha vida

Dedico

Agradecimentos

Ao colega, amigo e orientador, Prof. Dr. Ângelo Vieira dos Reis, pela extrema dedicação e apoio.

Em especial ao meu irmão Prof. Dr. Antônio Lilles Tavares Machado, pela co-orientação, dedicação, ensinamentos, incentivo e amizade.

A família Junkherr, na pessoa do acadêmico do Curso de Engenharia Agrícola, da UNISC, Sérgio Jardel Junkherr, que gentilmente disponibilizou a área para realização dos trabalhos.

Ao amigo Prof. Msc. Mauro Fernando Pranke Ferreira, pela colaboração na coleta dos dados de campo, incentivo e amizade.

Ao Téc. Agrícola Adroaldo Oliveira, funcionário do Curso de Engenharia Agrícola da UNISC, pela colaboração na coleta dos dados de campo, instrumentação do laboratório e amizade.

Ao acadêmico Régis Berwanger, pela colaboração na coleta dos dados de campo.

Aos meus pais pelas palavras de carinho e afeto.

Resumo

MACHADO, Roberto Lilles Tavares. **Capacidade de suporte de um Argissolo sob plantio direto a partir da resistência do solo à penetração e teor de água do solo.** 2008. 63f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O objetivo deste trabalho foi determinar a capacidade de suporte de carga do Argissolo através da determinação da resistência do solo à penetração em diferentes teores de água. Os objetivos específicos foram: a) quantificar a tensão de pré-adensamento do Argissolo em diferentes teores de água; b) quantificar a resistência do solo à penetração em diferentes teores de água; c) estabelecer a relação entre tensão de pré-adensamento e a resistência à penetração; d) desenvolver uma metodologia de estimativa rápida da capacidade de suporte do solo a partir da determinação da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo. Os resultados indicaram que a tensão de pré-adensamento varia de forma inversa com o teor de água do solo, a capacidade de suporte de carga do solo pode ser adequadamente estimada a partir de função de pedotransferência e que mesmo o solo estando sob teores de água que caracterizam seu estado de consistência friável, pode ocorrer compactação deste, desde que a capacidade de suporte de carga seja excedida. A caracterização do índice de cone em campo e laboratório apresentou similaridade de comportamento, correlacionando-se negativamente com o teor de água do solo. Foi comprovado que a capacidade de suporte de carga do solo pode ser estimada a partir da avaliação do índice de cone através de uma relação positiva e linear. A metodologia de determinação do teor de água do solo através do tato e aparência pode ser utilizada como ferramenta para a caracterização rápida do estado de consistência do Argissolo. Portanto, baseado nos resultados observados é possível afirmar que somando a metodologia de determinação do teor de água do solo através do tato e aparência com a relação encontrada de 19:1 entre o índice de cone e a tensão de pré-adensamento e as relações de índice de cone e da tensão de pré-adensamento com o teor de água do solo é possível a estimativa de forma rápida e com um bom grau de precisão da capacidade de suporte e índice de cone do Argissolo.

Abstract

MACHADO, Roberto Lilles Tavares. **Capacity of load support of a Paleudalf estimated from the penetration resistance and soil water content.** 2008. 63f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

The objective of this work was to determine the capacity of load support of a Paleudalf through the determination of the penetration resistance of the soil in different water contents. The specific objectives were: a) to quantify the pre-compression stress of Paleudalf in different water contents; b) to quantify the penetration resistance of the soil in different water content; c) to establish the relationship between pre-compression stress and the penetration resistance; d) to develop a methodology of fast estimation of the capacity of support of the soil starting with the determination of the penetration resistance of the soil and its water content. The results indicated that the pre-compression stress varies in an inverse way with the soil water content, the capacity of load support of the soil can be appropriately estimated from pedotransfer function and that even the soil being under a water content that characterize its state of consistence as friable, its compactation can happen, since the capacity of load support is exceeded. The characterization of the cone index in field and laboratory presented a similar behavior, being negatively correlated with the soil water content. It was proven that the capacity of load support can be estimated from the evaluation of the cone index through a positive and linear relationship. The methodology of determination of the soil water content through the touch and appearance can be used as a tool for the fast characterization of the state of consistence of Paleudalf. Therefore, based on the observed results, it is possible to affirm that adding the methodology of determination of the soil water content through the touch and appearance with the found relationship of 19:1 between the cone index and the pre-compression stress and the relationships of cone index and the pre-compression stress with the soil water content, is possible to estimate the support capacity and cone index of Paleudalf in a fast way and with a good degree of precision.

Lista de Figuras

Figura 1	Curva de compressão do solo	18
Figura 2	Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. LC: limite de contração; LP: limite de plasticidade; LL: limite de liquidez	26
Figura 3	Coleta das amostras no campo	31
Figura 4	Câmara de Richards	32
Figura 5	Equipamento Digital Shear Machine	32
Figura 6	Método de Pacheco e Silva para determinação da T_p	33
Figura 7	Relação entre a tensão de pré-adensamento (T_p) e o teor de água no solo (U_g) e função de pedotransferência	36
Figura 8	Penetrógrafo eletrônico de laboratório	45
Figura 9	Relação entre o IC_L e o U_g	47
Figura 10	Relação entre o IC_C e o U_g	48
Figura 11	Relação entre o IC_C , IC_L e o U_g	49
Figura 12	Tensão de pré-adensamento (T_p) versus índice de cone medido em campo (IC_C) no Argissolo	53
Figura 13	Aparência do solo no estado de consistência seco, com teor de água de $0,02 \text{ kg.kg}^{-1}$ (2%): a) antes de ser manipulado; b) quando manipulado com a mão	59
Figura 14	Aparência do solo no estado de consistência friável, com teor de água de $0,10 \text{ kg.kg}^{-1}$ (10%): a) antes de ser manipulado; b) quando manipulado com a mão	59
Figura 15	Aparência do solo no estado de consistência plástico, com teor de água de $0,17 \text{ kg.kg}^{-1}$ (17%): a) antes de ser manipulado; b) quando manipulado com a mão	60
Figura 16	Aparência do solo no estado de consistência líquido, com teor de água de $0,28 \text{ kg.kg}^{-1}$ (28%): a) antes de ser manipulado; b) quando manipulado com a mão.	60

Lista de Tabelas

Tabela 1	Parâmetros físicos para caracterização do solo estudado (valores médios de dez repetições)	34
Tabela 2	Pressão de contato pneu/solo para tratores 4x2 e 4x4, classificados em faixa de potência	37
Tabela 3	Valores de T_p obtidos através da equação 1 em função de U_g	39
Tabela 4	Valores do IC_L para U_g dos limites do estado de consistência do solo	47
Tabela 5	Teor de água no Argissolo submetido a plantio direto e estado de consistência	57
Tabela 6	Limites de Atterberg para Argissolo Vermelho distrófico latossólico, classe textural Franco Argilo Arenoso	58
Tabela 7	Valores de T_p em função dos estados de consistência do solo	61
Tabela 8	Valores de T_p em função de IC_C do Argissolo	62
Tabela 9	Valores de IC_C em função dos estados de consistência e U_g do Argissolo	62

Lista de Abreviaturas e Siglas

Dp	Densidade de partículas do solo
Ds	Densidade do solo
FPT	Função de pedotransferência
IC	Índice de cone
IC _C	Índice de cone de campo
IC _L	Índice de cone de laboratório
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MP	Macroporosidade do solo
mp	Microporosidade do solo
Pt	Porosidade total
RF	Região de Friabilidade
RP	Região de Plasticidade
Rp	Resistência do solo à penetração
Tp	Tensão de pré-adensamento
Ug	Teor de água do solo

Sumário

1 Introdução Geral	12
2 Revisão de Literatura	16
2.1 Compressão do solo	16
2.2 Resistência do solo à penetração	21
2.3 Teor de água do solo	24
3 Tensão de pré-adensamento de um Argissolo sob plantio direto em diferentes teores de água do solo	28
3.1 Introdução	28
3.2 Material e métodos	29
3.3 Resultados e discussão	34
3.3.1 Parâmetros físicos do solo	34
3.3.2 Pressão de pré-adensamento	35
3.4 Conclusões	39
4 Índice de cone de um Argissolo sob plantio direto em diferentes teores de água do solo	41
4.1 Introdução	41
4.2 Material e métodos	43
4.3 Resultados e discussão	46
4.3.1 Parâmetros físicos do solo	46
4.3.2 Resistência do solo à penetração	46
4.4 Conclusões	50

5 Determinação da capacidade de suporte de um Argissolo a partir da resistência do solo à penetração	51
5.1 Introdução	51
5.2 Material e métodos	52
5.3 Resultados e discussão	53
5.4 Conclusões	55
6 Metodologia de determinação da capacidade de suporte de um Argissolo com base na resistência à penetração e teor de água	56
6.1 Introdução	56
6.2 Material e métodos	57
6.3 Resultados e discussão	58
6.4 Conclusões	63
7 Conclusões gerais	64
8 Recomendações para futuros trabalhos	65
9 Referências	66
10 Apêndices	74

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um recurso frágil e básico na agricultura a manutenção de sua eficiência, como meio para a produção de culturas anuais e perenes, tem adquirido grande importância nos últimos anos.

Com a finalidade de melhorar o processo de produção agrícola, diversas formas de manejo têm sido propostas com o objetivo de atingir maior eficiência da produção agrícola associada a sustentabilidade do solo.

Define-se sustentabilidade, na agricultura, como a capacidade do sistema em produzir alimentos e fibras sem comprometer as condições que tornam possível este processo de produção, sendo dependente direta da manutenção da qualidade do solo ao longo do tempo.

Qualidades do solo são os atributos inerentes a este, os quais são inferidos através de características ou observações indiretas, como compactabilidade, erodibilidade e fertilidade (CURI et al., 1993; SSSA, 2007).

O solo é uma unidade tridimensional complexa, com atributos biológicos, químicos e físicos, seus indicadores de qualidade devem interagir, pelo menos, com alguns desses atributos. De todos os indicadores, os relacionados à sua qualidade física possuem especial importância, pois, esta quando deteriorada, é difícil de recuperar. A compreensão, a quantificação e previsão do impacto do uso e do manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais no desenvolvimento de uma agricultura sustentável.

A qualidade física é extremamente afetada pela sua compactação, sendo uma das importantes causas da degradação dos solos agrícolas no mundo.

Alguns dos efeitos negativos da compactação são: o aumento da resistência mecânica ao crescimento radicular, a redução na capacidade de infiltração da água

ou aeração, o que vem a afetar a produtividade e a sustentabilidade do sistema agrícola.

Estima-se que cerca de 68 milhões de hectares de terras agrícolas no mundo estão reduzindo a sua qualidade física em decorrência do processo de compactação ao qual estão sujeitas (FLOWERS; LAL, 1998).

O estado de compactação do solo tem sido avaliado por meio de diversos parâmetros físicos e mecânicos, tais como sua densidade, porosidade total, relação de vazios, resistência à penetração das raízes e tensão de pré-adensamento, entre outros, sendo esses indicadores de sua qualidade física e mecânica.

O estudo da compressibilidade dos solos permite a identificação da máxima carga que esse pode suportar, sem apresentar uma deformação permanente. A utilização, nas operações agrícolas, de máquinas com maior capacidade de trabalho e, portanto, com maior massa, torna importante o estudo e o conhecimento da compressibilidade, pois assim pode-se evitar a ocorrência de deformações que venham a propiciar problemas de compactação.

A curva de compressão vem sendo utilizada para compreender o processo compressivo de solos parcialmente saturados, permitindo determinar a tensão de pré-adensamento. Entretanto sua confecção baseia-se num processo lento e com utilização de equipamentos de custo elevado.

Devido à importância do conhecimento da tensão de pré-adensamento em sistemas agrícolas, pesquisadores têm procurado formas alternativas de obter este indicador, por meio de relações e funções de pedotransferência (FPTs), que permitam estimá-la com base em propriedades facilmente mensuráveis em solos de clima tropical.

O termo Funções de Pedotransferência foi introduzido por Bouna (1989) com a finalidade de padronizar outros termos anteriormente utilizados com a mesma finalidade. Funções de pedotransferência podem ser definidas como funções utilizadas para fazer estimativas de propriedades dos solos a partir de outras propriedades medidas rotineiramente com maior facilidade e baixo custo (McBRATNEY et al., 2002), descrevendo a relação quantitativa entre propriedades ou indicadores de qualidade do solo.

O teor de água e a resistência à penetração são propriedades físico-mecânicas que podem ser utilizadas em relações e em funções de pedotransferência conjuntamente com a tensão de pré-adensamento.

Solos que apresentam valores elevados do índice de compressão exibem grandes mudanças na relação entre ar, água e sólidos quando ocorre a aplicação de uma pressão, podendo assim atingir mais facilmente condições inadequadas para o crescimento das plantas. De outra forma, valores elevados de tensão de pré-adensamento determinam condições favoráveis ao tráfego e desfavoráveis para o crescimento das raízes, sendo associados a valores elevados de resistência à penetração.

Logo, vem a ser importante caracterizar-se o processo de compressão, bem como determinar-se o índice de compressão e a tensão de pré-adensamento para os Argissolos, em diferentes sistemas de manejo, os quais ocupam, em termos percentuais, a maior parte da área territorial do Rio Grande do Sul de acordo com Streck et al. (2002) e estão amplamente distribuídos por todo o território brasileiro.

A obtenção de uma função de pedotransferência da tensão de pré-adensamento, a partir da quantificação da resistência à penetração representa uma determinação útil do estado mecânico do solo para seu uso, manejo e planejamento da mecanização agrícola sendo um processo de execução bastante rápida no campo.

O teor de água é um fator amplamente reconhecido como determinante do comportamento compressivo dos solos e da resistência à penetração. Como a tensão de pré-adensamento e a resistência à penetração também dependem do teor de água entre outras propriedades, espera-se que exista uma relação entre elas.

O teor de água pode ser determinado por diversos métodos e equipamentos, mas em muitos casos uma estimativa é suficiente. Dessa forma um procedimento que possibilite de maneira prática, fácil e rápida a estimativa do teor de água e a compressibilidade do solo através da resistência à penetração seria de grande utilidade para agricultores e técnicos da área.

Assim, o objetivo geral deste estudo foi determinar a capacidade de suporte de carga do Argissolo através da determinação da resistência do solo à penetração em diferentes teores de água. Os objetivos específicos foram: a) quantificar a tensão de pré-adensamento do Argissolo em diferentes teores de água; b) quantificar a resistência à penetração em diferentes teores de água do solo; c) estabelecer a relação entre tensão de pré-adensamento e a resistência à penetração; d) desenvolver uma metodologia de estimativa rápida da capacidade de suporte do

solo a partir da determinação da resistência do solo à penetração para diferentes teores de água.

Com a finalidade de facilitar a compreensão o trabalho foi montado de forma que em cada capítulo é apresentada toda a informação referente aos objetivos específicos, incluindo revisão bibliográfica, material e métodos, resultados e discussão e conclusões...

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica geral sobre o assunto abordado no estudo, sendo dividido em Compressão do solo, Resistência do solo à penetração e Teor de água no solo. Os objetivos específicos são tratados em cada um dos demais capítulos.

No capítulo 3, serão discutidos e quantificados o efeito da variação do teor de água na tensão de pré-adensamento do Argissolo e as suas conseqüências no trabalho com máquinas agrícolas. A quantificação da resistência à penetração através de penetrômetro de campo e de laboratório em Argissolo com diferentes teores de água será determinada e estudada no capítulo 4. Com base nas discussões e resultados dos capítulos 3 e 4, no capítulo 5 será apresentado o estudo da relação entre tensão de pré-adensamento e resistência à penetração e a obtenção de um índice de determinação da tensão através da resistência. No capítulo 6 é apresentada metodologia para a avaliação da capacidade de suporte de carga do Argissolo através da determinação do teor de água e resistência à penetração.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Compressão do Solo

Na agricultura o desafio a ser vencido é a otimização da produção de alimentos, através de uma agricultura sustentável, onde seja evitado o desperdício e reduzido o risco de contaminação e degradação ambiental causada pelos excedentes de insumos, sistemas de manejo do solo diferenciados e distribuição de tráfego de máquinas e implementos agrícolas.

As propriedades físicas desempenham importante papel, se não o principal dentre as propriedades do solo. A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo na sua qualidade física são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (DEXTER; YOUNGS, 1992).

O efeito das máquinas agrícolas sobre as propriedades físicas dos solos pode ser benéfico ou prejudicial, de acordo com as condições em que este se encontra quando se realiza o tráfego (MACHADO, 1995).

O uso intenso da mecanização tem provocado alterações na estrutura do solo, alterações essas desfavoráveis ao crescimento das plantas, como a formação de camadas compactadas que provocam uma redução do volume de poros, aumentando dessa forma sua densidade (MACHADO, 1995).

De acordo com Lanças (2000), a compactação do solo não é uma propriedade e sim o efeito da variação de algumas de suas propriedades, devido a ação de cargas externas como o tráfego de máquinas e ação de ferramentas agrícolas.

No Brasil, as extensas áreas agrícolas com características de solo, relevo e clima peculiar, têm favorecido que a mecanização agrícola seja utilizada

intensamente e inadequadamente na maioria das vezes, não respeitando a capacidade de suporte de carga do solo e tão pouco seu teor de água ideal para o tráfego (SILVA et al., 2006).

A qualidade física do solo é extremamente afetada pela sua compactação, sendo uma das importantes causas da degradação dos solos agrícolas no mundo. Esta induz alterações na sua estrutura, com aumento da resistência e da densidade do solo (Soane e Ouwerkerk apud Imhoff, 2002).

De acordo com Sanchez apud Araújo, Tormena e Silva (2004), avaliações das modificações no solo decorrentes do cultivo deveriam ser feitas submetendo um solo sob vegetação natural às explorações agrícolas desejadas e analisando suas propriedades periodicamente. No entanto, por diferentes razões, é difícil atender a essas condições experimentais. Alternativamente, estes estudos podem ser feitos utilizando-se solos cultivados e sob mata nativa, desde que mantidos os critérios genéticos e topográficos relacionados com a sua formação.

Nos últimos anos novas técnicas e métodos de laboratório e campo têm auxiliado em uma nova visão da avaliação da compactação dos solos agrícolas. A simples avaliação da densidade, atributo ainda muito utilizado como indicador da compactação do solo, tem dado lugar a outros métodos, sendo um deles a predição da sua capacidade de suporte de carga através de modelagem. Segundo Silva et al. (2006), esta forma de avaliar os efeitos do tráfego no processo de compactação tem apresentado como novos indicadores a estimativa de uma importante propriedade mecânica do solo, a tensão de pré-adensamento.

O histórico de tensões do solo é refletido pela tensão de pré-adensamento, a qual indica a maior tensão a qual o solo já suportou até o momento (OLIVEIRA; DIAS JÚNIOR; RESECK, 2003).

A tensão de pré-adensamento deve ser a tensão máxima induzida ao solo para que a compactação adicional seja evitada.

No manejo, o conhecimento da capacidade de suporte de carga e da susceptibilidade à compactação pode auxiliar na escolha de máquinas agrícolas que exerçam menores pressões e na redução do impacto causado à qualidade estrutural de solos agrícolas (MOSADDEGHI et al., 2003).

A compressão do solo diz respeito ao processo de redução do volume deste quando uma pressão externa é aplicada. Este termo abrange duas definições amplamente utilizadas consolidação e compactação do solo. A consolidação refere-

se à compressão de solos saturados enquanto que a compactação refere-se à compressão de solos não saturados (GUPTA; ALLMARAS, 1987).

O entendimento do processo de compressão envolve a avaliação das curvas de compressão uniaxial. Conforme Dias Junior e Pierce (1996), a curva de compressão do solo (Fig. 1) tem sido utilizada para simular as reduções de volume deste, representando graficamente a relação entre o logaritmo da tensão aplicada e algum parâmetro relacionado com o arranjo das partículas e/ou agregados, como o índice de vazios ou densidade.

Em situações nas quais o solo ainda não tenha sofrido pressões prévias, a relação anteriormente descrita vem a ser linear e qualquer pressão aplicada ao solo proporcionará deformações plásticas, isto é, não recuperáveis. No entanto, se este já sofreu carregamentos anteriores, as deformações provocadas por novas pressões podem ou não virem a ser recuperáveis (MACHADO, 2001).

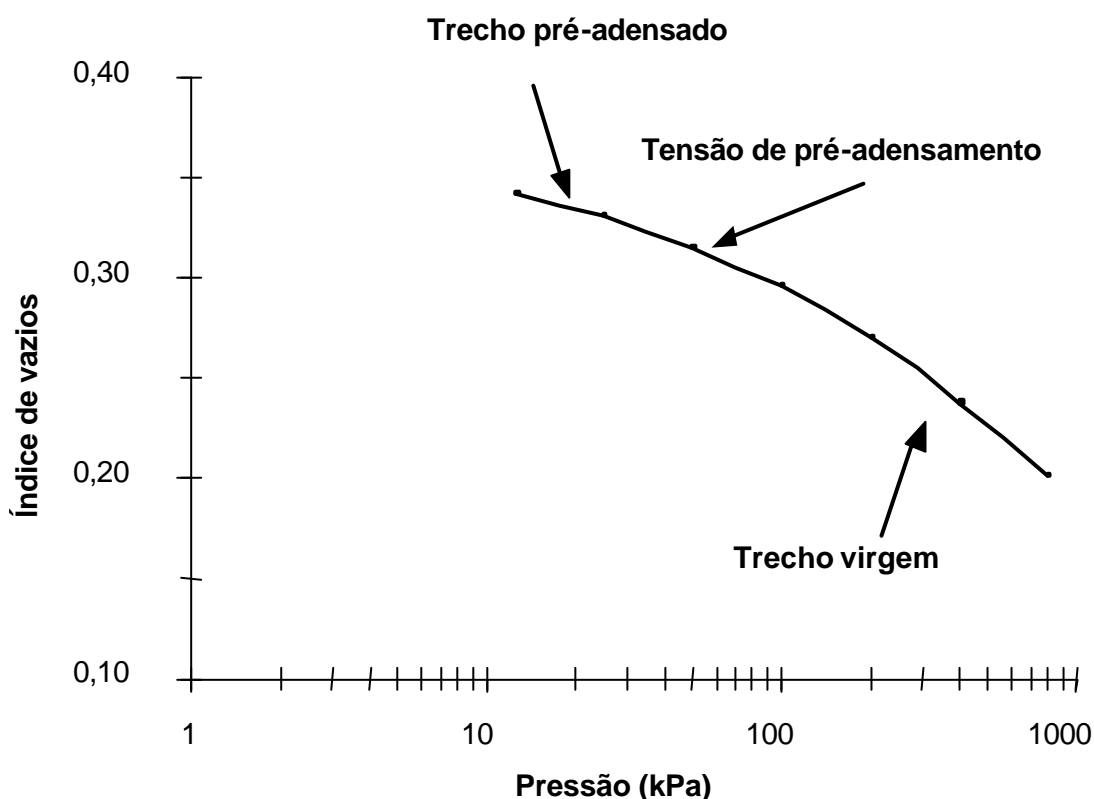


Figura 1 – Curva de compressão do solo
Fonte: MACHADO, 2001

Segundo Dias Junior e Pierce (1996), a compressibilidade do solo é função de fatores externos, caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência da carga

aplicada e fatores internos influenciados pela história de tensões, teor de água, textura e densidade.

A compressibilidade é a expressão quantitativa da resposta do solo à compactação dentro de limites pré-estabelecidos para a aplicação de certo estresse (SOANE, 1990).

Para a mesma condição, o fator que governa o nível de deformação que poderá ocorrer no solo é o seu teor de água. Assim, quando os solos estão mais secos, sua capacidade de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas (MACHADO, 2001). Portanto a preocupação com a suscetibilidade do solo reside na definição de qual o teor de água adequado para a execução das operações com máquinas agrícolas e estimativa de quanto de deformação ocorrerá, quando as tensões aplicadas excederem a sua capacidade de suporte (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

Machado e Trein (2000), pesquisando a compressibilidade de dois solos do Rio Grande do Sul, um Planossolo e um Latossolo Vermelho-Escuro, em três diferentes níveis de teor de água observaram que, quando estes se encontram nas suas fases friável e seca, as tensões de pré-adensamento são muito próximas, demonstrando que, nestas condições de teor de água tanto um quanto o outro resistem a carregamentos semelhantes, antes de começarem a sofrer grandes deformações. Entretanto, quando ambos encontram-se na sua fase plástica, observaram que o Latossolo Vermelho-Escuro, de textura argilosa, apresenta uma resistência à deformação bem menor do que o Planossolo, de textura arenosa, sendo praticamente a metade da resistência deste último.

Para a mesma condição, o teor de água, no momento em que ocorre a pressão, é um fator determinante da intensidade de compactação (MACHADO et al., 2005b).

Mosaddeghi et al. (2003), estudando a relação da tensão de pré-adensamento com as propriedades físico-mecânicas de um solo com estrutura instável, verificaram que a tensão de pré-adensamento apresentou alta relação negativa com o teor de água.

Segundo Imhoff (2002), embora vários autores tenham determinado o valor da tensão de pré-adensamento para diferentes classes de solo e sistemas produtivos, poucos modelos foram desenvolvidos para estimar esse parâmetro a partir de atributos do solo.

Silva, Reinert e Reichert (2000), estudando um Latossolo Vermelho-Escuro e um Podzólico Vermelho-Amarelo, verificaram que a tensão de pré-adensamento foi função linear do teor de água e densidade desses.

Silva et al. (2002), pesquisando sobre a tensão de pré-adensamento num Latossolo Vermelho distrófico e num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico submetido a dois sistemas de manejo, plantio direto e convencional, verificaram que a tensão de pré-adensamento variou com o sistema de manejo utilizado, aumentando de forma exponencial com o aumento da densidade do solo, para determinada classe de grau de saturação. Os autores salientam que, devido à variação nos resultados encontrados para solos de regiões tropicais, há necessidade de estudos sobre a influência do estado de compactação e teor de água na tensão de pré-adensamento, em outras classes de solos e sistemas de manejo.

De acordo com Dias Junior e Pierce (1996), há necessidade de desenvolver pesquisas básicas e aplicadas que permitam um melhor entendimento do processo de compressão dos solos de regiões tropicais, e integrar essas informações em modelos ou funções que permitam estimar os efeitos da compactação.

Veiga et al. (2007), em estudo sobre compressibilidade e penetrabilidade num Nitossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo, verificaram altos valores da tensão de pré-adensamento e por conseqüência uma alta compactação resultado da alta resistência do solo à penetração em sistema de plantio direto.

Em sistema de plantio direto, a compactação ocorre mais superficialmente devido ao tráfego de máquinas e rodados agrícolas (ARAÚJO, 2001).

Como descrito anteriormente a tensão de pré-adensamento pode ser utilizada, como indicador da capacidade de carga dos solos parcialmente saturados, uma vez que a aplicação de cargas maiores que esse valor induzem a uma compactação adicional do solo e por conseqüência, à degradação da qualidade física do mesmo (LEBERT; HORN, 1991; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

Kondo e Dias Júnior (1999) avaliaram a tensão de pré-adensamento em Latossolos sob diferentes teores de água nas condições de cultura anual, mata e pastagem. As curvas de compressão uniaxial refletiram o efeito do manejo e do teor de água na capacidade de suporte de carga do solo. Os autores sugeriram que a tensão de pré-adensamento seja considerada como um indicador quantitativo da sustentabilidade estrutural (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

Salire, Hammel e Hardcastle (1994), apresentaram uma relação linear e positiva entre a tensão de pré-adensamento e a densidade do solo, concluindo assim que a tensão de pré-adensamento pode ser usada como um indicador confiável na determinação da tensão máxima a ser exercida com a finalidade de prevenir contra a compactação do solo.

Apesar da unanimidade a respeito de sua utilidade, a determinação da tensão de pré-adensamento é um processo lento e está associado à aquisição de equipamentos de custo elevado. A metodologia de determinação deste indicador exige a construção da curva de compressão uniaxial que tem por base a aplicação de tensões sucessivas a intervalos regulares de tempo. Sendo assim, pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento de formas alternativas de se obter este indicador por meio de relações que possibilitem determiná-lo a partir de propriedades facilmente mensuráveis em solos tropicais.

2.2 Resistência do Solo à Penetração (R_p)

A mecanização agrícola é um componente básico na maioria das estratégias de desenvolvimento rural e no aumento da produtividade. No entanto, sua introdução desordenada sem adaptação prévia aos diferentes tipos de solos, pode ocasionar uma rápida e contínua degradação desse recurso natural (SIQUEIRA, 1999).

Regiões de alta resistência à penetração no solo podem surgir, muitas vezes, como resultado de fenômenos naturais ou devido à compactação por máquinas agrícolas pesadas (MACHADO; TREIN; BICCA, 1998).

A compactação é um processo que leva ao aumento de sua resistência, redução da porosidade, da continuidade de poros, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água (PRADO; ROQUE; SOUZA, 2002). Esse processo afeta o crescimento e o desenvolvimento radicular, aumenta a densidade do solo, as perdas de nitrogênio por desnitrificação, o consumo de combustível das máquinas no preparo dos solos compactados, a erosão pela menor infiltração de água reduzindo o rendimento da cultura e, portanto, conduzindo a graves perdas econômicas (PRADO; ROQUE; SOUZA, 2002; MACHADO; TREIN; BICCA, 1998).

Várias propriedades do solo podem ser utilizadas na determinação do estado de compactação desse, em geral, utilizam-se propriedades relacionadas à relação massa/volume e de resistência à penetração que este oferece.

A resistência à penetração é mais eficiente que a densidade do solo para a identificação do estado de compactação e camadas compactadas. Segundo Voorhees, Senst e Nelson (1978), esta apresentou maior sensibilidade como indicador de camadas e estados de compactação. Nesse estudo o tráfego de máquinas agrícolas aumentou a densidade em 20%, enquanto que a resistência à penetração foi aumentada em 400%.

A resistência do solo à penetração é uma propriedade física do solo que influencia diretamente o crescimento das raízes das plantas (LETEY, 1985; THOMPSON; JANSEN; HOOKS, 1987). Sendo que essa ocorre devido a dois fatores: a) compressão das partículas primárias e agregados e b) fricção entre partículas primárias e agregados durante o movimento relativo da raiz (GROENEVELT et al. apud SECCO, 2003).

No campo, a resistência à penetração é bastante variável, sendo muito influenciada pelas condições de manejo do solo e a intensidade de tráfego das máquinas agrícolas e é dependente do teor de água e densidade, sendo correlacionada positivamente com a densidade e negativamente com o teor de água.

Uma das várias formas de caracterizar o estado de compactação do solo é a utilização de penetrômetros ou penetrógrafos, que são aparelhos capazes de determinar a resistência à penetração de uma ponteira cônica. O uso deste aparelho permite a identificação de zonas de maior resistência e, por consequência, a localização de regiões compactadas de um determinado solo (MACHADO et al., 2005a).

As medidas da resistência à penetração podem ser feitas em pequenos incrementos de profundidade e mostradas de forma gráfica, o que facilita a visualização das possíveis zonas de compactação (MACHADO et al., 2005a).

Vários autores têm correlacionado a resistência à penetração com o desenvolvimento das raízes, mas segundo Misra et al. (1986) devido ao desenho, rigidez e dimensões do penetrômetro, esses estudos superestimam a resistência à penetração de duas a oito vezes à encontrada pelas raízes.

A resistência que o solo oferece ao desenvolvimento das raízes difere da resistência medida pelos penetrômetros. A raiz cresce através dos poros e pontos de

menor resistência, enquanto que os penetrômetros avaliam a resistência média oferecida à introdução de um cone metálico (SECCO, 2003).

A identificação, no campo, de camadas compactadas é qualitativa, porque não se conhece um valor específico de resistência à penetração crítica para a maioria das culturas e tipos de solos.

Tavares Filho et. al (2001), verificaram valores de resistência à penetração para o plantio direto de 3,54 MPa e para o convencional de 2,24 MPa, nos 15 cm superficiais, em Latossolo Vermelho distroférico típico no norte do Paraná, cultivado sob plantio direto por 20 anos e sistema convencional por 10 anos. Tais valores de resistência à penetração, embora elevados, não foram impeditivos para o crescimento radicular nos dois sistemas de manejo do solo.

De maneira geral, se aceita o valor de 2,0 MPa como sendo o valor limite ao crescimento radicular da maioria das espécies cultivadas e o solo passa a ser considerado como sendo compactado.

Mas como a resistência está diretamente relacionada ao teor de água do solo, têm sido bastante difícil estabelecer no campo os valores críticos de resistência visto que o umedecimento e secagem devidos a chuvas, alteram as condições rapidamente de uma possível situação limitante para outra não limitante, em termos de resistência do solo à penetração e também da variabilidade espacial da umidade do solo (SECCO, 2003).

Klein e Boller (1995) e Klein, Libardi e Silva (1998), também comentam que a dependência dos resultados de resistência à penetração em relação ao teor de água e densidade do solo dificultam a sua interpretação.

O valor de 2,0 MPa foi determinado na sua maioria, em experimentos com plântulas e em solos desestruturados colocados em vasos. Esse valor limite pode estar relacionado com o crescimento radicular em solos desestruturados, mas nos estruturados, as raízes exploram áreas de menor resistência e macroporos, geralmente entre agregados, por isso, conseguem desenvolverem-se em solos com alta resistência à penetração (PIKUL; RAMIG; WILKINS, 1993).

Os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada.

Apesar de certas limitações, usa-se a resistência à penetração do solo para avaliar o estado de compactação e como indicativo do nível da compactação, em solos de mesmo tipo e mesmo teor de água, principalmente em função da facilidade

de manuseio do penetrômetro e rapidez na obtenção dos resultados (MACHADO et al., 2005b).

Sendo a tensão de pré-adensamento a tensão máxima induzida ao solo permitida para que a compactação adicional seja evitada, tem aumentado a importância da determinação da tensão de pré-adensamento como indicador da capacidade de suporte de carga dos solos em sistemas agrícolas.

A tensão de pré-adensamento é uma estimativa da resistência do solo, a qual quando elevada pode ser indicativo de restrição ao desenvolvimento radicular (CANARACHE; HORN; COLIBAS, 2000; MOSADDEGHI et al., 2003). Com base nesta indicação, a resistência à penetração, a qual é utilizada para estabelecer condições restritivas ao desenvolvimento radicular, à produtividade das culturas e indicativo do estado de compactação do solo, tem grande possibilidade de uso na estimativa da capacidade de suporte de solos parcialmente saturados.

Uma estimativa da tensão de pré-adensamento, a partir da determinação da resistência do solo à penetração é uma avaliação importante do estado físico-mecânico do solo para o seu manejo e utilização de máquinas agrícolas. Sendo a determinação da resistência à penetração um processo rápido (NEVENS; REHEUL, 2003).

Culley e Larson (1987) em estudo sobre a compressibilidade de um solo franco argiloso submetido a dois sistemas de manejo verificaram uma relação linear entre a tensão de pré-adensamento e a resistência à penetração. Esta relação foi confirmada por Canarache, Horn e Colibas (2000) e Mosaddeghi et al. (2003).

Com base nesta relação e que restrições ao crescimento radicular ocorrem em geral a valores de resistência do solo à penetração superiores a 2,0 MPa, em geral, a estimativa da capacidade de suporte de carga do solo com base em valores de resistência à penetração consideradas não impeditivas ao crescimento radicular, poderá evitar a degradação da qualidade física dos solos submetidos a diferentes sistemas de manejo e sistemas de mecanização agrícola.

2.3 Teor de Água do Solo (Ug)

No Brasil em muitas áreas agrícolas, a mecanização tem sido praticada de forma exaustiva e quase sempre de forma inadequada, não respeitando a

capacidade de suporte de carga do solo e muito menos o teor de água para o tráfego, sendo essa forma de trabalho técnica e ecologicamente incorreta (SILVA et. al, 2006).

Conforme Fernández e Galloway (1987), a distribuição da pressão no solo em função da compressão exercida pelas rodas das máquinas depende de diversos fatores como: carga, extensão da área de contato pneu-solo, distribuição da pressão na área de contato, teor de água e densidade do solo.

O teor de água, no momento em que ocorre a pressão, é um fator determinante da intensidade de compactação.

Estudo de Oliveira, Dias Júnior e Reseck (2003) demonstrou que independentemente do uso ou manejo a que foi submetido o solo, as várias tensões de água influenciaram o seu comportamento compressivo.

As tensões de água e os sistemas de manejo influem nas deformações do solo, as quais se apresentam mais elevadas nas tensões mais baixas e na condição de solo mais poroso, caracterizando a necessidade de se conhecer o teor de água quando da decisão da utilização de máquinas em áreas agrícolas.

Dependendo do tipo de solo e de seu teor de água pode-se adotar certos limites de tensões mecânicas que serão aplicadas a este (HAKANSSON; REEDER, 1994; HAKANSSON, 1994; HAKANSSON; MEDVEDEV, 1995). Tal fato foi confirmado em estudo realizado por Machado e Trein (2000), os quais verificaram que ao reduzir o teor de água em amostras de Planossolo e Latossolo Vermelho-Escuro, ocorreu aumento na sua resistência à compressão, que se comportou diferentemente em cada solo estudado.

Sabe-se que o teor de água em conjunto com a textura são os fatores que ditam a capacidade do solo em resistir às tensões de compressão, conforme observaram Machado e Trein (2000).

Segundo Silva et al. (2006) os limites de consistência do solo representam o teor de água do estado de consistência em que o mesmo se encontra (Fig. 2). Através destes limites são identificados os estados ou regiões de consistência, importantes para o tráfego agrícola ou preparo do solo: a) região de friabilidade (RF) que representa a faixa de umidade entre o limite de contração e o limite plástico, e b) região de plasticidade (RP), que representa a faixa de umidade entre o limite plástico e o limite de liquidez.

Ashburner e Sims (1984), explicam que, se um solo estiver com baixo teor de água, apresentará elevada resistência proporcionando pouca deformação antes de haver modificação na sua estrutura. No estado friável, a deformação é proporcional à carga aplicada e revertida rapidamente quando o carregamento é removido. Já quando o solo apresenta elevado teor de água, estado plástico, ele deforma-se lentamente em função da carga aplicada não havendo reversão quando esta é removida.

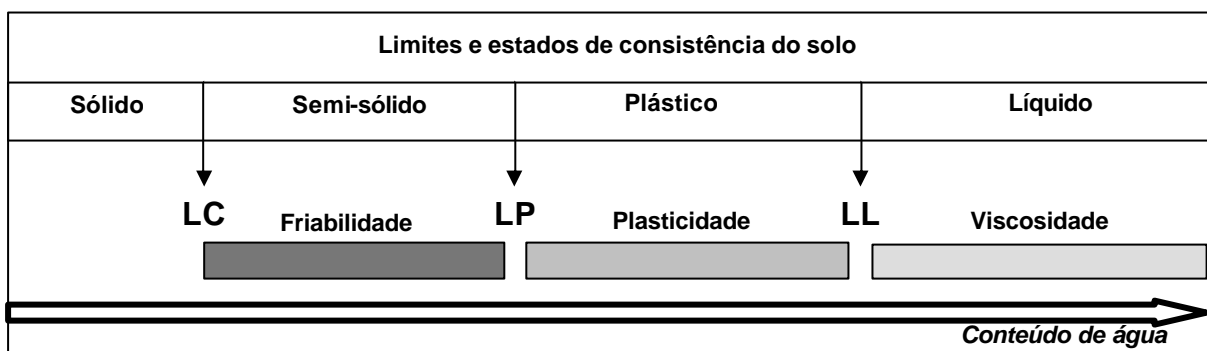


Figura 2 – Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. LC: limite de contração; LP: limite de plasticidade; LL: limite de liquidez.

Fonte: SILVA et al., 2006

Os resultados de estudo de Pereira et al. (2002), revelam que o uso de máquinas agrícolas em solo argiloso com teor de água na faixa ótima de 'Proctor' pode conduzir a um aumento da compactação do solo.

O ensaio de Proctor é executado na Mecânica dos Solos para a determinação do teor de água ótimo (aquele que produzirá a máxima densidade) e da densidade máxima de um solo, o qual consiste em compactar uma amostra dentro de um recipiente cilíndrico, com aproximadamente $0,001 \text{ m}^3$, em três camadas sucessivas, sob ação de 25 golpes de um soquete, pesando 2,5 kg, caindo de 0,30 m de altura. O ensaio é repetido para diferentes teores de água, determinando-se, para cada um deles, a densidade do solo. Com os valores obtidos traça-se uma curva de densidade em função do teor de água, de onde, se obtém o ponto correspondente ao teor de água ótimo e densidade do solo máxima.

Lima (2004) menciona que a variação dos indicadores físicos, resistência à penetração e tensão de pré-adensamento está associada com a variação do teor de água.

Estudos têm indicado que a resistência à penetração e que a tensão de pré-adensamento diminuem com o aumento do teor de água (MAGALHÃES; MOLIN;

FAULIN, 2005; MACHADO et al., 2005b; ANDREOLLA et al., 2006; SECCO et al., 2006).

Um dos principais problemas relacionados à compactação dos solos reside na realização de operações com máquinas agrícolas quando este apresenta teor de água inadequada para o tráfego de máquinas.

A capacidade do solo à deformação é medida pela sua consistência que, segundo Baver, Gardner e Gardner (1972), é definida como a manifestação das forças de coesão e adesão. Eles afirmam que, no teor de água em que os solos são friáveis, as condições são ótimas para todas as operações de trabalho. Logo, essa faixa de teor de água é definida como um índice de trafegabilidade para as operações agrícolas, sendo determinada pelos limites de plasticidade e de contração.

Existem diversas técnicas e equipamentos para a determinação da água no solo de forma quantitativa (RIGHES et al., 2003). Na sua grande maioria, as técnicas utilizadas necessitam de muito tempo para a realização e/ou equipamentos de elevado custo. Mas nem sempre é necessário e prático determinar quantitativamente ou de forma exata o teor de água. Em muitos casos é suficiente uma estimativa do teor de água (KOHNKE, 1968).

Através do método do tato e aparência é possível estimar a quantidade de água do solo. A sensação ao tato e a aparência do solo variam com a textura e o teor de água no solo, sendo que as condições de teor de água, por experiência, podem ser estimadas com uma exatidão de aproximadamente 5% (USDA, 2000).

3 TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO DE UM ARGISSOLO SOB PLANTIO DIRETO EM DIFERENTES TEORES DE ÁGUA

3.1 Introdução

A qualidade física do solo é extremamente afetada pela sua compactação, sendo uma das importantes causas da degradação dos solos agrícolas no mundo.

O estudo da compressibilidade dos solos permite a identificação da máxima carga que esse pode suportar, sem apresentar uma deformação permanente. A utilização, nas operações agrícolas, de máquinas com maior capacidade de trabalho e, portanto, com maior massa, torna importante o estudo e conhecimento da compressibilidade, pois assim pode-se evitar a ocorrência de deformações que venham a causar problemas de compactação dos solos.

A curva de compressão vem sendo utilizada para compreender o processo compressivo de solos parcialmente saturados, permitindo determinar a tensão de pré-adensamento (T_p) dos solos.

A tensão de pré-adensamento é a maior tensão que o solo já suportou no passado, o que em termos de agricultura reflete o tipo de manejo utilizado, sendo o único atributo físico do solo capaz de quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados a este, sem que haja compactação adicional.

A tensão de pré-adensamento divide a curva de compressão em duas regiões, uma de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (trecho pré-adensado), e uma de deformações plásticas e não recuperáveis (trecho ou reta de compressão-*virgem*), conforme Lebert e Horn (1991).

Portanto, o solo deve ser cultivado ou trafegado nas condições referentes ao trecho pré-adensado da curva de compressão, isto é, deve-se evitar a aplicação de

pressões maiores do que aquelas previamente experimentadas por este, no sentido de evitar danos à estrutura do mesmo (MACHADO, 2001).

Assim, através da compressibilidade pode-se estudar a relação tensão/deformação dos solos para que seja possível o estabelecimento da capacidade de suporte de cargas (tensão de pré-adensamento) e a sua suscetibilidade à compactação (índice de compressão), segundo Secco (2003).

Para a mesma condição, o fator que governa o nível de deformação que poderá ocorrer no solo é o seu teor de água (MACHADO et. al, 2005a). Assim, quando os solos estão mais secos, sua capacidade de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas (MACHADO, 2001).

Machado e Trein (2000) estudando a compressibilidade de dois solos do estado do Rio Grande do Sul, um Planossolo e outro Latossolo Vermelho-Escuro, em três diferentes níveis de teor de água observaram que, quando estes encontram-se nas suas fases friável e seca, as tensões de pré-adensamento são muito próximas, demonstrando que, nestas condições, tanto um quanto o outro solo resistem a carregamentos semelhantes, antes de começarem a sofrer grandes deformações. Entretanto, quando ambos encontram-se na sua fase plástica, observaram que o Latossolo Vermelho-Escuro, de textura argilosa, apresenta uma resistência à deformação bem menor do que o Planossolo, de textura arenosa, sendo praticamente a metade da resistência deste último.

É importante desenvolver modelos que estimem a tensão máxima que o solo pode suportar sem a ocorrência de compactação adicional em diferentes teores de água, com base na sua história de tensão. Desta forma torna-se possível planejar a utilização de máquinas agrícolas com a maior capacidade de trabalho e, portanto, com maior massa, com base no teor de água, evitando-se assim deformações que venham a proporcionar problemas de compactação.

O objetivo deste trabalho foi quantificar o comportamento da tensão de pré-adensamento de um Argissolo sob plantio direto em diferentes teores de água.

3.2 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido na propriedade da família Junkherr, localizada no Município de Rio Pardo, na localidade de Rincão del Rei, no estado do Rio Grande

do Sul, 29°52'03" latitude sul e 52°22'38" longitude oeste, altitude de 92m, região fisiográfica da Depressão Central. Nesta região, o tipo climático dominante é o Cfa na classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.604,1mm.

O solo da propriedade é classificado como Argissolo Vermelho distrófico latossólico (EMBRAPA, 1999), unidade de mapeamento Rio Pardo. Os Argissolos são solos geralmente profundos a muito profundos e bem drenados (STRECK et al., 2002).

Foi utilizada uma área de 30 m x 50 m (1.500 m²), dentro de um campo que tem sido cultivado a mais de 20 anos sendo que nos últimos 5 anos com soja e/ou milho em plantio direto.

O solo da área em estudo foi caracterizado do ponto de vista físico, através de análises realizadas no Laboratório de Agrohidrologia do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), para amostras coletadas na profundidade de 0,10 m a 0,20 m, de acordo com os procedimentos de rotina e utilizando os seguintes métodos para cada determinação:

- 1) Análise Granulométrica: foi determinada pelo Método do Densímetro, segundo o procedimento descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997);
- 2) Limites de Consistência do Solo, limite de liquidez e limite de plasticidade: foram determinados pelo Método de Casagrande, segundo procedimento descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997). O estado de consistência seco foi caracterizado através do teor de água em amostra do solo submetida a tensão de 1.000 kPa em câmara de pressão de Richards;
- 3) Densidade de Partículas: foi determinada pelo Método do Balão Volumétrico, conforme procedimento apresentado no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997);
- 4) Teor de água do Solo: foi determinada pelo Método da Estufa, segundo o procedimento apresentado no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997);

5) Densidade do Solo: foi determinada pelo Método do Anel Volumétrico, segundo o procedimento descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997), modificado pelo Laboratório de Agrohidrologia do Curso de Engenharia Agrícola da UNISC, o qual utiliza anel com volume de $86,75 \text{ cm}^3$;

6) Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade: foram determinadas pelo Método da Mesa de Tensão, conforme procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997);

Gontijo (2007), trabalhando com solo de textura muito argilosa, sugere que a distância mínima entre amostra para a determinação da tensão de pré-adensamento seja 19,5 m e o número de amostras necessárias para obter-se uma variação de 10% em torno da média, a 5% de significância, é de dez. Sendo assim, na área foram coletadas duas amostras indeformadas na profundidade de 0,10 m à 0,20 m em dez pontos diferentes, respeitando o espaçamento mínimo de 20,0m entre amostras.

Na coleta das amostras, fig 3, foram utilizados anéis com 0,020 m de altura e 0,063 m de diâmetro, sendo realizada no mês de fevereiro de 2008.



Figura 3 - Coleta das amostras no campo.

Para a execução do procedimento em laboratório, cada uma das duas amostras de cada ponto foi saturada e submetida a um nível de tensão em Câmara de Pressão de Richards (2,0 e 50,0 kPa), fig. 4, com a finalidade de deixar a amostra em um teor de água equivalente ao estado plástico e friável conforme os limites de consistência do solo.



Figura 4 – Câmara de Richards.

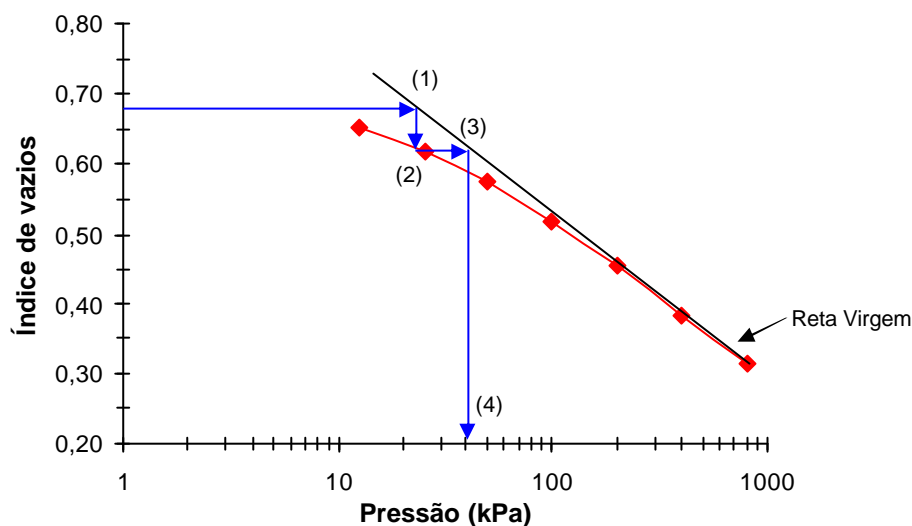
No laboratório para a determinação da tensão de pré-adensamento a cada nível de teor de água foram observadas as recomendações da Norma MB-3336 (ABNT, 1990) Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional, através da utilização do aparelho Digital Shear Machine da marca ELE International®, fig. 5, pertencente ao Laboratório de Agrohidrologia do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade de Santa Cruz do Sul, sendo cada amostra submetida a sete incrementos de carga, que foram; 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa.



Figura 5 – Equipamento para cisalhamento direto marca Digital Shear Machine.

Os intervalos de tempo, para execução das leituras após cada carregamento, propostos na Norma são 0min; 0,125min; 0,250min; 0,500min; 1min; 2min; 3min; 4min; 8min; 15min até 24 horas. Porém, Machado (2001) e Carpenedo (1994), considerando que as cargas aplicadas aos solos agrícolas são dinâmicas,

concluíram em testes prévios, que mais de 90% da deformação da amostra ocorre nos primeiros 5 minutos após a aplicação das cargas, o qual é compatível com a permanência do maquinário agrícola sobre este. Dessa forma foram efetuadas leituras em intervalos de 0,5min; 1min; 2min; 4min e 5min, após o qual se aplicou um novo carregamento. Nos testes foram utilizadas aplicações sucessivas de cargas. Com estes dados, foi construída a curva deformação–tensão vertical do solo para cada nível de teor de água equivalente ao estado de consistência desejado. A partir desta curva, a tensão de pré-adensamento foi determinada pelo método de Pacheco Silva, fig. 6, de acordo com a ABNT (1990), utilizando planilha de cálculo eletrônica.



- (1) Prolonga-se a reta virgem até encontrar a horizontal que passa pelo índice de vazios inicial do solo;
- (2) Traça-se uma vertical passando pela intersecção das duas retas anteriores encontrando-se com a curva;
- (3) Deste ponto, traça-se uma horizontal até cruzar com a reta virgem. A abscissa deste ponto de intersecção é a procurada;
- (4) Tensão de Pré-adensamento.

Figura 6 – Método de Pacheco e Silva para determinação da T_p .

Além das curvas de compressão, (ver Apêndice 1), para os diferentes teores de água do solo, foi construído gráfico relacionando a tensão de pré-adensamento com o teor de água do solo ou modelo de capacidade de suporte de carga com os seus respectivos limites e estados de consistência, plotando-se a tensão de pré-adensamento no eixo das ordenadas e os teores de água simulados em laboratório no eixo das abcissas.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Parâmetros Físicos do Solo

Os dados referentes aos parâmetros físicos, para caracterização do solo estudado, Argissolo Vermelho distrófico latossólico (EMBRAPA, 1999), encontram-se na tab. 1.

Com base nos dados da tab. 1, referentes à textura do solo e utilizando-se o diagrama de repartições de Classes Texturais para classificação granulométrica, apresentado em Oliveira, Jacomine e Camargo (1992), pode-se classificar o Argissolo Vermelho distrófico latossólico como sendo de textura Franco Argilo Arenoso.

Tabela 1 – Parâmetros físicos para caracterização do solo estudado (valores médios de dez repetições).

Parâmetro	Argissolo	
Textura do solo	(%)	CV (%)
Areia	51,46	5,87
Silte	26,28	6,88
Argila	22,27	7,83
Densidade	(kg.m³)	CV (%)
Ds	1.785,05	3,49
Dp	2.594,55	4,08
Porosidade	(m³.m⁻³)	CV (%)
MP	0,03	27,41
mp	0,27	6,67
Pt	0,30	6,79
Limites de Atterberg	(kg.kg⁻¹)	
Limite Superior de Plasticidade	0,228	
Limite Inferior de Plasticidade	0,135	
Limite Seco	0,100	
Índice de Plasticidade	0,093	

A densidade do solo é um parâmetro físico que pode ser utilizado para se inferir sobre a porosidade total, seja pela natureza e arranjo das partículas

sólidas, ou pela compactação. O solo em estudo apresenta um valor de densidade do solo elevado para o sistema de plantio direto se comparado de forma direta com trabalhos de pesquisadores (DE MARIA, CASTRO, DIAS, 1999; OLIVEIRA et al., 2003; DE TOLEDO et al., 2006) onde foram encontrados valores de 1.200 kg.m^{-3} , porém normal se comparado ao valor de densidade do solo restritiva apresentado por Collares (2005), ou seja, valor superior a 1.700 kg.m^{-3} . Mas se a densidade do solo for avaliada de forma associada com a macroporosidade, tab. 1, apresentada pelo Argissolo em estudo, confirma-se o alto valor desta devido ao baixo valor de macroporosidade.

O teor de água acima do Limite Superior de Plasticidade caracteriza o solo em seu estado fluido. O teor de água entre o Limite Inferior de Plasticidade e o Limite Superior de Plasticidade caracteriza o estado plástico, enquanto que abaixo do Limite Inferior de Plasticidade até o Limite Seco, o solo encontra-se em seu estado friável. Quando o teor de água estiver abaixo do Limite Seco, caracteriza o estado seco do solo.

Por meio de pré-testes verificou-se que, para o solo estudado ao aplicar-se a sucção de 2,0 kPa, a quantidade de água remanescente corresponderia ao teor de água na sua fase plástica, pois o valor obtido foi abaixo do Limite Superior de Plasticidade e acima do Limite Inferior de Plasticidade. Quando este foi submetido a uma sucção de 50,0 kPa, proporcionou-se a expulsão da água em limites que permitiram atingir-se o estado friável, visto que o teor de água obtido ficou abaixo do Limite Inferior de Plasticidade.

3.3.2 Tensão de Pré-Adensamento do Solo (T_p)

A variação da tensão de pré-adensamento está associada à variação do teor de água no solo ao qual às amostras foram submetidas.

A fig. 7 apresenta o efeito negativo do teor de água na tensão de pré-adensamento, esse explicou 84,0 % da variabilidade dos dados, verifica-se alta correlação entre essas duas variáveis, o que está de acordo com Mosaddeghi et al. (2003), estudando solo franco argilo siltoso, encontraram forte correlação potencial de 75,0 % do teor de água com a tensão de pré-adensamento. Esta alta correlação indica que o teor de água é um dos principais agentes determinantes da tensão de

pré-adensamento, o que está de acordo com diversos estudos realizados (MACHADO et al., 2005 b; KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; MACHADO, 2001).

Com o aumento do teor de água no solo há a formação de película de água sobre a superfície das partículas gerando a redução do número de contatos entre estas, o que provoca a diminuição das forças de ligação entre elas, reduzindo assim a capacidade de suporte de carga do solo.

Segundo Mosaddeghi et al. (2003), essa forte correlação entre a tensão de pré-adensamento e o teor de água reflete a dominância das forças de coesão mais do que de fricção na resistência de solos argilosos.

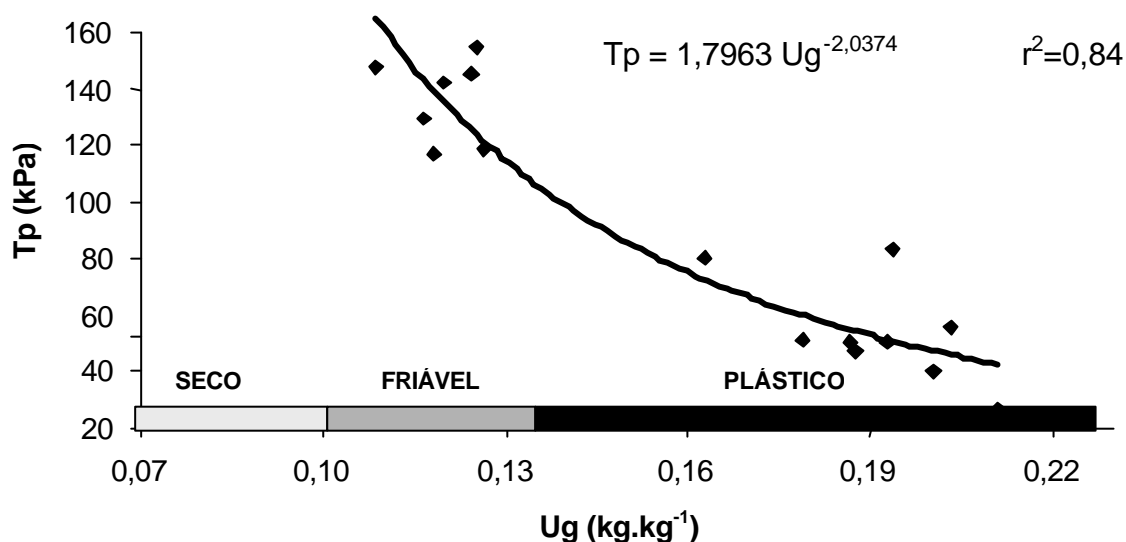


Figura 7 - Relação entre a tensão de pré-adensamento (T_p) e o teor de água do solo (U_g) e função de pedotransferência.

A tensão de pré-adensamento para o teor de água no estado de consistência do solo friável (U_g de 0,10 à 0,135 kg.kg^{-1}) apresentou valores variando de 116 à 155 kPa. Lima et al. (2006) determinaram valores de tensão de pré-adensamento de 100 à 200 kPa para um Argissolo Vermelho distrófico em sistema de plantio direto. A pequena diferença entre os resultados pode ser associada ao teor de água das amostras, 0,07 à 0,10 kg.kg^{-1} em relação ao do presente estudo.

A função de pedotransferência que define o comportamento da tensão de pré-adensamento em função do teor de água no Argissolo, fig. 7, é importante para previsão do comportamento do solo em relação à capacidade de suportar as pressões exercidas pelas máquinas e implementos agrícolas sobre este.

Assim para um determinado teor de água através da função de pedotransferência pode se determinar qual a capacidade de suporte máxima desse Argissolo, ou seja, qual a pressão máxima que poderá ser aplicada sem implicar compactação adicional ao solo, permitindo, dessa forma, planejar antecipadamente o tipo de máquina agrícola ou o momento adequado para utilização dessa máquina.

Machado e Machado (2003), estudando a compressibilidade do solo influenciada pela pressão proporcionada pelos pneus de tratores apresentam os dados da tab. 2, na qual consta a pressão de contato, calculada através da equação de Inns e Kilgour (1978), exercida pelos pneus de diversos tratores, de fabricação nacional, divididos em cinco faixas, variando em função de seu tipo de tração e potência.

Tabela 2 – Pressão de contato pneu/solo para tratores 4x2 e 4x4, classificados em faixa de potência.

Pressão de contato pneu/solo (kPa)		
Potência do trator 4x2 (kW)	Rodado dianteiro	Rodado traseiro
51 – 70	36,38	45,51
71 – 90	44,21	55,35
91 – 100	40,34	47,00
Potência do trator 4x4 (kW)	Rodado dianteiro	Rodado traseiro
51 – 70	47,79	34,41
71 – 90	46,98	39,44
91 – 110	48,85	39,90
111 – 130	51,50	40,62
Acima de 131	51,30	48,44

Fonte: Machado e Machado (2003)

Com base na tab. 2, o Argissolo estudado, apresentou capacidade de suportar as cargas impostas pelo trânsito dos tratores, quando em seu estado friável e no plástico até o teor de água de $0,19 \text{ kg.kg}^{-1}$, através do comportamento da relação entre a tensão de pré-adensamento e o teor de água é possível presumir que no estado de consistência do solo seco o Argissolo apresenta capacidade de suportar as cargas impostas pelas pressões de contato pneu/solo apresentados na tab. 2.

Capellesso et al. (2005), em estudo sobre avaliação da área de contato pneu/solo e equações de determinação, concluíram que a equação de Inns e Kilgour (1978) utilizada para o cálculo da pressão de contato na tab. 2, superestima em 60% os valores da área de contato pneu/solo. Dessa forma os valores da tab. 2, deveriam ser corrigidos em 150%, o que elevaria a menor pressão de contato para 86,03 kPa e a maior para 138,38 kPa.

Para essas novas pressões de contato e com base na função de pedotransferência o Argissolo estudado, teria capacidade de suportar as cargas devido ao trânsito de tratores, com valores de teor de água de até $0,12 \text{ kg.kg}^{-1}$, valor esse menor que o limite superior do estado de consistência friável desse solo, para a maior pressão de contato (138,30 kPa) e até o teor de água de $0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$, já no estado plástico de consistência, para a menor pressão de contato (86,03 kPa).

Estudo de Silva et al. (2006), apresenta como menor valor de pressão de contato pneu/solo para colhedoras o valor de 282 kPa para o rodado traseiro, verifica-se através do gráfico que para essa pressão de contato o solo estudado só teria capacidade de suporte na faixa de consistência seca.

Estima-se que as pressões médias aplicadas aos solos pelas máquinas agrícolas se situam entre 50 e 300 kPa (LEBERT; HORN, 1991; CARPENEDO, 1994; SILVA et al., 2000a) e os reboques e caminhões podem exercer pressões entre 300 e 600kPa (CARPENEDO, 1994; SILVA et al., 2000a).

Através da função de pedotransferência do Argissolo foi montada a tab. 3, a qual apresenta valores de teor de água no solo e a respectiva tensão de pré-adensamento do solo estimada.

Ao analisar a tab. 3 verifica-se que o solo estudado terá capacidade de suporte das pressões médias exercidas pelas máquinas agrícolas quando estiver com o teor de água no estado seco e friável e no estado plástico até o teor de água de $0,19 \text{ kg.kg}^{-1}$.

Quanto à recomendação para o trabalho com máquinas no estado de consistência do solo friável (Hillel, 1982), considerando também a tensão de pré-adensamento como a maior pressão que deve ser aplicada ao solo para evitar que a compactação adicional ocorra, constata-se que a faixa de pressões possíveis de serem aplicadas na zona de friabilidade do solo em estudo para evitar a compactação variaram de 106 a 196 kPa, para teores de água entre $0,135$ e $0,10 \text{ kg.kg}^{-1}$ respectivamente.

Tabela 3 - Valores de T_p obtidos através da função de pedotransferência do Argissolo (fig. 7) em função de U_g .

U_g (kg.kg^{-1})	T_p (kPa)
0,220	39,3
0,190	52,9
0,135	106,2
0,110	161,2
0,100	195,8
0,080	308,5
0,070	404,9
0,060	554,3

Verifica-se que há necessidade de cuidado na tomada de decisão com relação ao momento mais adequado para o uso de máquinas agrícolas, pois mesmo estando o solo sob teores de água que caracterizam seu estado friável, pode ocorrer compactação, visto que a sua capacidade de suporte de carga pode ser excedida, o que é corroborado por Kondo e Dias Júnior (1999).

Conforme Machado (2001) a obtenção de dados referentes à tensão de pré-adensamento do solo em diferentes níveis de teor de água é importante, no sentido de definir a situação de utilização de máquinas agrícolas que não provoquem cargas que excedam a máxima pressão que este pode suportar para o teor de água que se apresenta no momento.

Dessa forma sugere-se que para a definição da utilização de máquinas agrícolas sejam consideradas as informações da relação existente entre tensão de pré-adensamento e teor de água.

3.4 Conclusões

A capacidade de suporte de carga do solo pode ser adequadamente estimada a partir da função de pedotransferência das variáveis tensão de pré-adensamento e teor de água.

O modelo de capacidade de suporte de carga do Argissolo pode ser expresso pela função $T_p = 1,7963 U_g^{-2,0374}$, em que T_p é a tensão de pré-adensamento e U_g é o teor de água do solo.

O Argissolo sob plantio direto objeto do estudo, apresentou capacidade de suporte às pressões exercidas por tratores agrícolas 4x2 até 100 kW e 4x4 acima de 131 kW.

Mesmo o solo estando sob teores de água que caracterizam seu estado de consistência como friável, pode ocorrer compactação deste, desde que a capacidade de suporte de carga seja excedida, através da aplicação de pressões superiores a esta.

4 ÍNDICE DE CONE DE UM ARGISSOLO SOB PLANTIO DIRETO EM DIFERENTES TEORES DE ÁGUA NO SOLO

4.1 Introdução

A mecanização agrícola é um componente básico na maioria das estratégias de desenvolvimento rural e no aumento da produtividade. No entanto, sua introdução desordenada sem adaptação prévia aos diferentes tipos de solos, pode ocasionar uma rápida e contínua degradação desse recurso natural (SIQUEIRA, 1999).

No sistema plantio direto, o agricultor mobiliza minimamente o solo, mas por outro lado emprega intenso tráfego de máquinas e equipamentos, desconsiderando as condições em que este se encontra e os procedimentos de cultivo a que foi submetido anteriormente. Essas práticas causam o aumento da compactação das camadas superficiais do solo, muitas vezes questionado pelos produtores como causador do decréscimo de rendimento e produtividade das culturas no decorrer dos anos (COLLARES, 2005).

No plantio direto, a ausência de revolvimento provoca um aumento da densidade do solo (KLEIN, 1998; SILVA et. al, 2000a), que refletirá em maior resistência à penetração (R_p).

Durante as operações de manejo e semeadura são aplicadas forças compressivas que afetam a resistência à penetração, o que ocorre devido às modificações das condições físicas do mesmo. A alta resistência do solo que se estabelece causa prejuízo ao crescimento do sistema radicular (SECCO, 2003).

Diversos autores verificaram que a resistência à penetração crítica ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas situa-se entre 1,0 MPa e 3,5 MPa

(CANARACHE et al., 1984; MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999). A variação desses valores críticos está associada ao tipo de planta, teor de argila, sistema de condução do experimento e ao sistema de manejo do solo. Porém, na maioria dos experimentos que relacionam o crescimento de raízes com a resistência à penetração indicam que valores acima de 2,0 MPa são considerados limitantes ao crescimento das raízes de diversas culturas.

O valor de 2,0 MPa foi determinado na sua maioria, em experimentos com plântulas e em solos desestruturados colocados em vasos. Esse valor limite de resistência à penetração pode estar relacionado com o crescimento radicular em solos desestruturados, mas em solos estruturados, as raízes exploram áreas de menor resistência à penetração e macroporos, geralmente entre agregados, por isso, conseguem desenvolverem-se em solos com alta resistência à penetração (PIKUL; RAMIG; WILKINS, 1993).

Busscher, Frederick e Bauer (2000) verificaram redução na produtividade de trigo e soja com o aumento da resistência à penetração, sendo que para a soja, a relação entre produtividade e resistência à penetração foi mais fraca do que para o trigo, refletindo a capacidade da soja em se adaptar em solos com alta densidade do solo e compensar períodos de alta resistência à penetração.

Em geral a resistência mecânica do solo à penetração aumenta com o aumento da densidade e decresce com o conteúdo de água, segundo Cassel e Lal apud Secco (2003).

Klein, Libardi e Silva (1998) afirmam que em muitos casos as diferenças de resistência encontradas podem ser confundidas pela influência do teor de água no momento da penetração.

A resistência do solo à penetração é fortemente influenciada pelo seu teor de água, textura e densidade (GOMES; PEÑA, 1996).

A relação negativa entre resistência do solo à penetração e o teor de água, e a relação positiva entre a resistência à penetração e a densidade do solo, é amplamente constatada na literatura para solos com diferentes teores de argila, sendo que, a resistência à penetração diminui com o incremento de argila, ou seja, variação na textura do solo, e do teor de água bem como a redução da densidade do solo (SILVA et al., 2008).

O conhecimento da variação da resistência à penetração com o teor de água permite estabelecer formas de manejo que procurem preservar a qualidade física dos solos, para crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas.

Conforme Silva et al. (2008), estratégias para simplificar a obtenção das curvas de teor de água e de resistência à penetração são necessárias e, nesse contexto, justifica-se a utilização de funções de pedotransferência, o que ainda é restrito.

A resistência à penetração pode ser avaliada através do Índice de Cone (IC), o qual representa a resistência à penetração média em um intervalo de profundidade do solo.

O índice de cone pode ser determinado em campo (IC_c) ou em laboratório (IC_L), através de penetrômetros de campo e laboratório respectivamente. Lima (2004) determinou equações de regressão semelhantes para índice de cone em laboratório e índice de cone de campo versus teor de água.

Embora para a determinação do índice de cone de laboratório seja necessário coletar amostras em campo e levá-las para o laboratório para serem analisadas através de penetrômetro de laboratório, para os pesquisadores apresenta a vantagem de propiciar o controle sobre o teor de água da amostra, possibilitando a análise da amostra com o teor de água desejado, o que no caso do índice de cone de campo depende de condições climáticas e estado do solo no momento da análise.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do teor de água no índice de cone em Argissolo sob plantio direto com penetrógrafo eletrônico de campo e penetrógrafo eletrônico de laboratório.

4.2 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido na propriedade da família Junkherr, localizada no Município de Rio Pardo, na localidade de Rincão del Rei, no estado do Rio Grande do Sul, 29°52'03" latitude sul e 52°22'38" longitude oeste, altitude de 92m, região fisiográfica da Depressão Central. Nesta região, o tipo climático dominante é o Cfa na classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.604,1mm.

O solo da propriedade é classificado como Argissolo Vermelho distrófico latossólico (EMBRAPA, 1999), unidade de mapeamento Rio Pardo. Os Argissolos são solos geralmente profundos a muito profundos e bem drenados (STRECK et al., 2002).

Foi utilizada uma área de 30 m x 50 m (1.500 m²), dentro de um campo que tem sido cultivado a mais de 20 anos sendo que nos últimos 5 anos com soja e/ou milho em plantio direto.

O solo da área em estudo foi caracterizado do ponto de vista físico, através de análises realizadas no Laboratório de Agrohidrologia do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), para amostras coletadas na profundidade de 0,10 m a 0,20 m, de acordo com os procedimentos de rotina e utilizando os seguintes métodos para cada determinação:

- 1) Análise Granulométrica: foi determinada pelo Método do Densímetro, segundo o procedimento descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997);
- 2) Limites de Consistência do Solo, limite de liquidez e limite de plasticidade: foram determinados pelo Método de Casagrande, segundo procedimento descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997). O estado de consistência seco foi caracterizado através do teor de água em amostra do solo submetida a tensão de 1.000 kPa em câmara de pressão de Richards;
- 3) Densidade de Partículas: foi determinada pelo Método do Balão Volumétrico, conforme procedimento apresentado no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997);
- 4) Teor de água do Solo: foi determinada pelo Método da Estufa, segundo o procedimento apresentado no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997);
- 5) Densidade do Solo: foi determinada pelo Método do Anel Volumétrico, segundo o procedimento descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997), modificado pelo Laboratório de Agrohidrologia do Curso de Engenharia Agrícola da UNISC, o qual utiliza anel com volume de 86,75 cm³;

6) Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade: foram determinadas pelo Método da Mesa de Tensão, conforme procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997);

Na área utilizada foram coletadas duas amostras indeformadas na profundidade 0,10 m a 0,20 m, nos mesmos pontos descritos no primeiro capítulo dessa tese. A profundidade de coleta das amostras baseou-se no fato de se tratar da região mais explorada pelo desenvolvimento radicular e dessa formar permitir melhor correlação com esse.

Na coleta das amostras foram utilizados anéis com 0,050 m de altura e 0,047 m de diâmetro, sendo realizada no mês de fevereiro de 2008.

Para a execução do procedimento, cada uma das amostras de cada ponto foi saturada e submetida a um nível de tensão em Câmara de Pressão de Richards (2,0; 50,0 e 1.000 kPa), com a finalidade de deixar a amostra em um nível de teor de água equivalente ao estado plástico, friável e seco conforme os limites de consistência do solo.

O índice de cone de laboratório foi determinado conforme Imhoff (2002), através da utilização de penetrógrafo eletrônico de laboratório, modelo MA-933, marca Marconi®, fig.8.

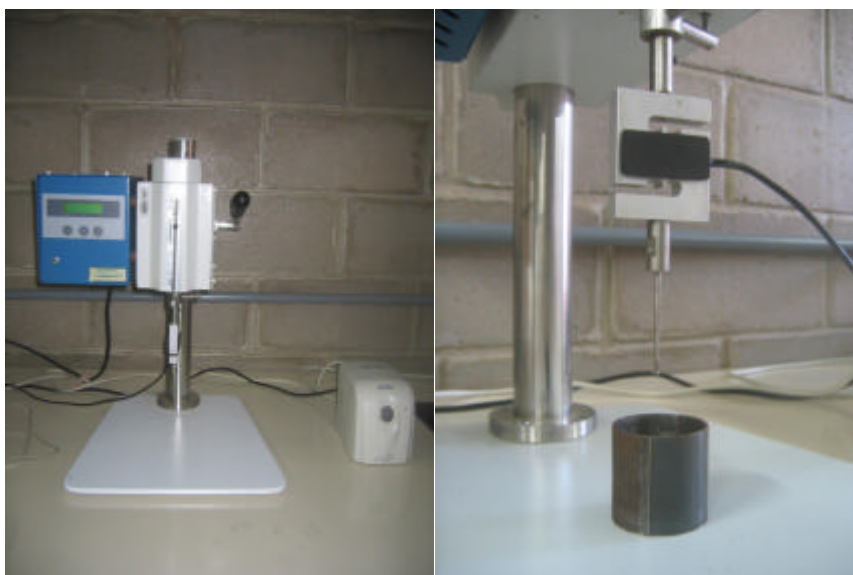


Figura 8 – Penetrógrafo eletrônico de laboratório

Na mesma área e pontos descritos anteriormente para determinação do índice de cone de Laboratório, foi feito o registro do índice de cone de campo da com penetrógrafo eletrônico de campo.

A resistência à penetração no campo foi mensurada de forma seqüencial a cada 0,01 m de profundidade do solo no intervalo de 0,0 m a 0,20 m no perfil do solo utilizando penetrógrafo digital de campo, equipado com sistema eletrônico de aquisição de dados modelo PLG1020 da marca Falker® e acoplado a um aparelho de GPS, modelo eTrex, marca Garmin.

Também foi determinado o teor de água na profundidade de 0,0 m a 0,20 m, através da coleta de amostra de solo deformada, com trado de rosca, no local e no momento da determinação com o penetrógrafo de campo.

A partir dos valores obtidos de resistência do solo à penetração na faixa de profundidade 0,10 m a 0,20 m em cada ponto, determinou-se o Índice de Cone, ou seja, a resistência média nesse intervalo.

De posse dos valores de índice de cone de laboratório e índice de cone de campo e teor de água na amostra ou no campo, ajustou-se uma equação entre esses valores.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Parâmetros Físicos do Solo

Os dados referentes aos parâmetros físicos, para caracterização do solo estudado, Argissolo Vermelho distrófico latossólico (EMBRAPA, 1999), encontram-se na tab. 1.

4.3.2 Índice de Cone (IC)

A variação do índice de cone encontra-se associada à variação do teor de água no solo ao qual as amostras foram submetidas.

Nos Apêndices 4 e 5 são apresentados os gráficos da variação da resistência à penetração em laboratório e campo e os valores de índice de cone de laboratório e índice de cone de campo determinados.

A fig. 9 apresenta o comportamento do índice de cone de laboratório em função do teor de água. Verifica-se que o índice de cone de laboratório diminui com

o aumento do teor de água do solo, o que está de acordo com estudos anteriores (HAKANSSON; VOORHESS; RILEY, 1988; VAZ e HOPMANS, 2001, MAGALHÃES; MOLIN; FAULIN, 2005). Essa relação negativa, através da equação potencial ajustada aos dados explicou 81,0 % da variação do índice de cone de laboratório.

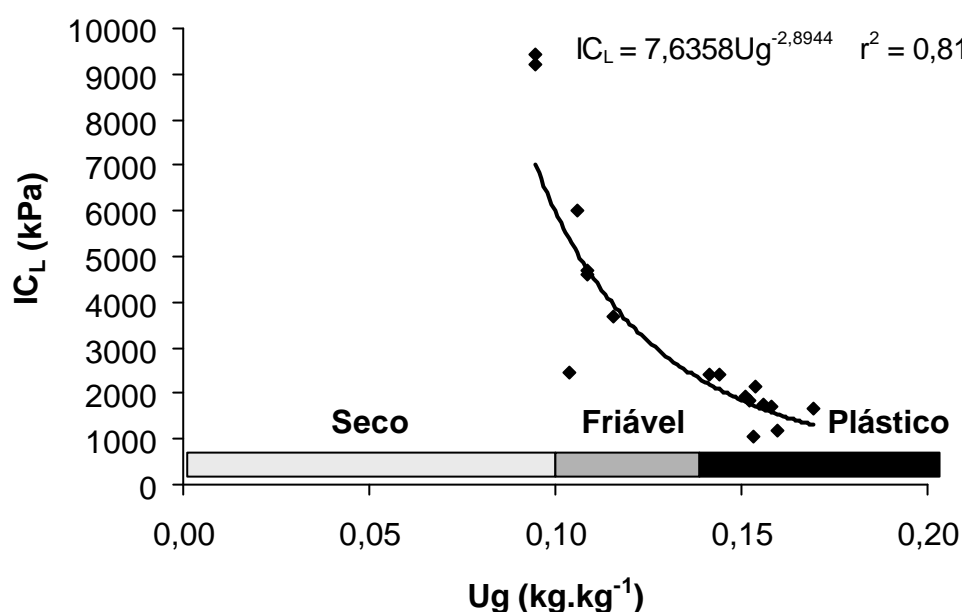


Figura 9 - Relação entre o IC_L e o U_g .

A equação ajustada fornece a possibilidade de inferência do índice de cone de laboratório em função do teor de água em estudo nos diferentes estados de consistência. Com base nesta equação foi montada a tab. 4, a qual apresenta o índice de cone para os limites de estado de consistência do solo estudado.

Tabela 4 – Valores do IC_L para os U_g dos limites do estado de consistência do solo.

Estado de Consistência	U_g ($kg.kg^{-1}$)	IC_L (kPa)*
seco	$< 0,10$	$> 5.987,6$
friável	$0,10 < U_g < 0,135$	$5.987,6 > IC_L > 2.512,0$
plástico	$0,135 < U_g < 0,228$	$2.512,0 > IC_L > 551,1$

* valor determinado com a equação ajustada.

Na fig. 10 tem-se o comportamento do índice de cone de campo em função da variação do teor de água.

Em virtude de no período de coleta dos dados em campo ter ocorrido uma precipitação de 85 mm na área utilizada para o estudo, não foi possível obter índice de cone de campo em teores de água no estado de consistência seco. Mas da

mesma forma que para o índice de cone de laboratório, observando-se a fig. 10, pode-se concluir que este índice varia negativamente com a variação do teor de água.

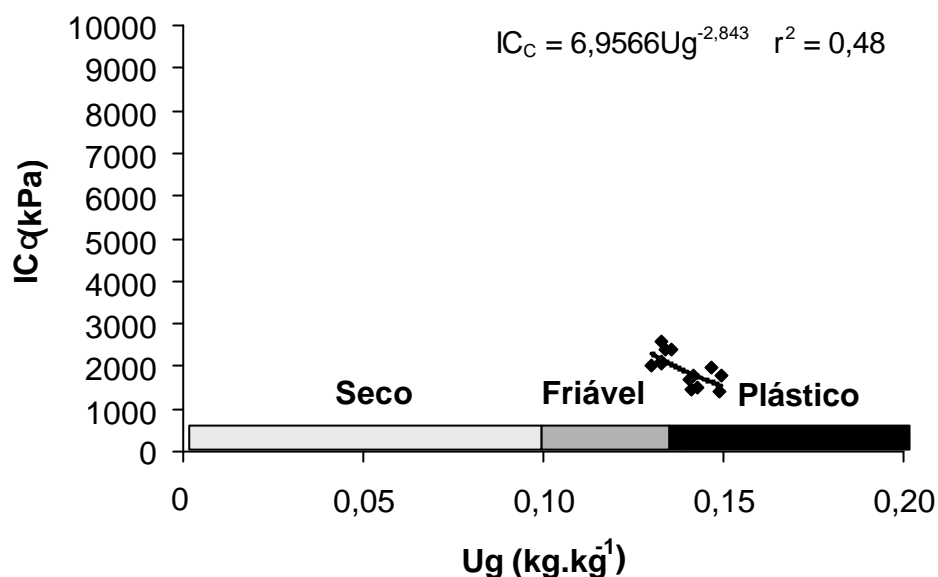


Figura 10 - Relação entre o IC_C e o U_g .

A equação de ajustada aos dados que define o comportamento índice de cone em função da variação do teor de água no Argissolo estudado apresentada na fig. 10, explicou 48,0 % da variabilidade do índice de campo.

Através da fig. 10, verifica-se valores de índice de campo na faixa de 1.400 a 2.500 kPa, aproximadamente para a profundidade e sistema de cultivo estudado, devido a não mobilização do solo, o que é corroborado por Azevedo, Siqueira e Monice Filho (2000) e Trein et al. (2006) os quais encontraram dados semelhantes na profundidade entre 0,10 e 0,20m em área sob plantio direto. Nagaoka et al. (2000) em trabalho que avaliou o efeito de diferentes sistemas de preparo do solo nos valores de resistência à penetração encontrou o valor médio de 2.082,69 kPa na profundidade de 0,10 a 0,20 m em sistema de plantio direto.

Através da fig. 11, podemos comparar o comportamento do índice de cone de laboratório e índice de cone de campo em função do teor de água, verifica-se diferença de valores de índice de cone dentro do mesmo estado de consistência, mas as curvas apresentaram a mesma tendência de comportamento, correlacionando negativamente o índice de cone com o teor de água. O coeficiente de correlação entre as duas curvas é de 0,89, para o intervalo de valores no estado

friável e plástico doe consistência do solo, demonstrando que estas guardam similaridade.

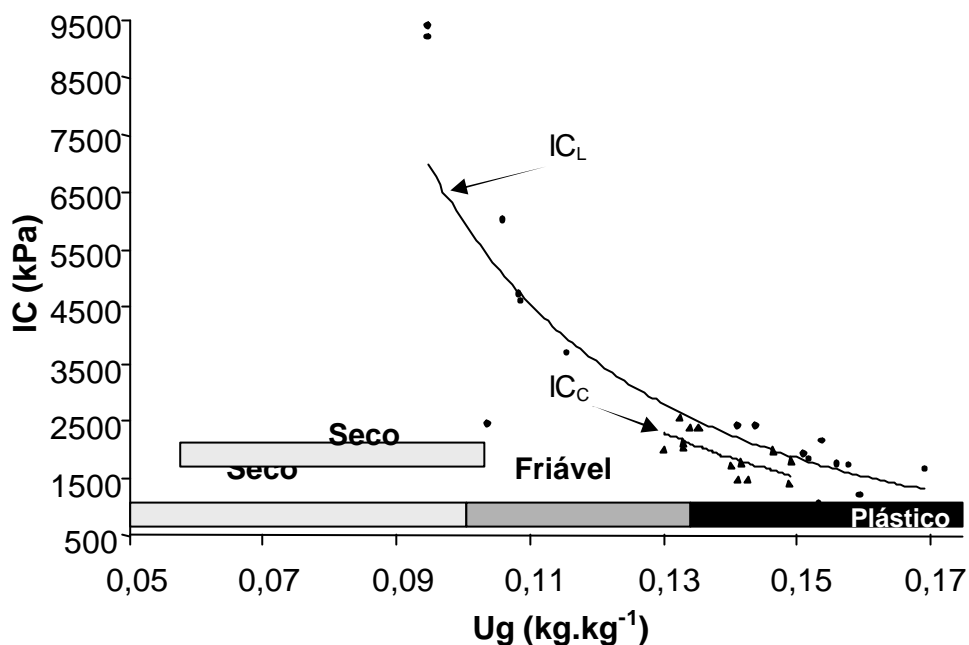


Figura 11 - Relação entre o IC_C, IC_L e o Ug.

A resistência à penetração apresenta forte relação com o crescimento radicular das plantas, no entanto, é acentuadamente influenciada pelo teor de umidade e pela condição estrutural do solo, assim dificultando a obtenção de valores críticos à produção das culturas.

De maneira geral se aceita o valor de 2.000 kPa como sendo o valor limite ao crescimento radicular da maioria das espécies cultivadas e o solo passa a ser considerado como sendo compactado.

Por outro lado, pesquisadores verificaram que solos excessivamente porosos são prejudiciais a absorção de água e nutrientes pelas raízes, devido ao menor contato solo/raiz, resultando em menor desenvolvimento das plantas.

Verifica-se que tanto na avaliação de campo como de laboratório o Argissolo da área estudada apresenta no estado de consistência friável e plástico valores superiores ao valor limite de 2.000 kPa, o que indica um solo compactado, pela recomendação geral e está compatível com os baixos valores de porosidade total e alto valor de densidade do solo apresentado pelo solo em estudo, o que pode ter sido provocado pelo tráfego das máquinas do sistema de plantio direto.

A resistência que o solo oferece ao desenvolvimento das raízes difere da resistência medida pelos penetrômetros. A raiz cresce através dos poros e pontos de menor resistência, enquanto que os penetrômetros avaliam a resistência média que o solo oferece à introdução do equipamento. No entanto, esse valor apresenta boa correlação com o desenvolvimento de raízes, validando a sua utilização.

4.4 Conclusões

Para as condições do Argissolo estudado, este se apresenta compactado visto que mesmo com a variação do teor de água o solo proporcionou valores de resistência à penetração superiores ou muito próximos de 2.000 kPa.

Através da equação gerada é possível estimar o índice de cone de campo do Argissolo estudado sabendo-se o valor do teor de água do solo.

A determinação do índice de cone através de análise de laboratório ou campo apresenta valores diferentes para o mesmo teor de água, mas com similaridade de comportamento em relação a variação do teor de água.

5 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE UM ARGISSOLO A PARTIR DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

5.1 Introdução

O uso intenso da mecanização tem provocado alterações na estrutura do solo, as quais muitas vezes são desfavoráveis ao crescimento das plantas, como a formação de camadas compactadas que provocam uma redução do volume de poros, aumentando sua densidade (MACHADO, 1995).

A qualidade física do solo é extremamente afetada pela sua compactação, sendo uma das importantes causas da degradação dos solos agrícolas no mundo.

Nos últimos anos, novas técnicas e métodos de laboratório e campo têm auxiliado em uma nova visão da avaliação da compactação dos solos agrícolas. A avaliação da densidade, atributo ainda muito utilizado como indicador da compactação do solo, tem dado lugar a outros métodos, sendo um deles a predição da sua capacidade suporte de carga através de modelagem. Segundo Silva et al. (2006), esta forma de avaliar os efeitos do tráfego no processo de compactação do tem apresentado como novos indicadores a estimativa de uma importante propriedade mecânica, a tensão de pré-adensamento.

A tensão de pré-adensamento vem a ser a tensão máxima induzida ao solo para que a compactação adicional seja evitada.

No manejo com máquinas agrícolas, o conhecimento da capacidade de suporte de carga e da susceptibilidade à compactação pode auxiliar na escolha de equipamentos que exerçam menores pressões contribuindo assim para a redução do impacto causado à qualidade estrutural de solos agrícolas (MOSADDEGHI et al., 2003).

A determinação da tensão de pré-adensamento é um processo lento e está associada à aquisição de equipamentos de custo elevado. A metodologia de determinação deste indicador exige a construção da curva de compressão uniaxial que tem por base a aplicação de tensões sucessivas a intervalos regulares de tempo.

Devido à importância da determinação da tensão de pré-adensamento em sistemas agrícolas, pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento de formas alternativas de se obter este indicador por meio de relações que possibilitem determiná-la a partir de propriedades facilmente mensuráveis.

A possibilidade de estimar a tensão de pré-adensamento a partir da determinação da resistência do solo à penetração pode tornar-se importante avaliação do seu estado físico-mecânico, tanto no que diz respeito ao seu manejo quanto a capacidade de suporte a utilização de máquinas agrícolas. A determinação da resistência do solo à penetração é um processo rápido (NEVENS; REHEUL, 2003), desta forma a possibilidade de sua utilização como método estimativo da tensão de pré-adensamento vem a ser importante. Com base nesta relação e no fato de que restrições ao crescimento radicular geralmente ocorrem a valores de resistência do solo à penetração superiores a 2,0 MPa, a estimativa da capacidade de suporte de carga do solo com base em valores de sua resistência à penetração vem a ser um agente facilitador no sentido de evitar-se a degradação da qualidade física dos solos submetidos a diferentes sistemas de manejo e mecanização agrícola.

O objetivo deste trabalho foi o de estabelecer a relação entre a tensão de pré-adensamento e a resistência à penetração de um Argissolo sob plantio direto, com a intenção de estabelecer sua capacidade de suporte de carga.

5.2 Material e Métodos

Com as informações sobre tensão de pré-adensamento e índice de cone de campo do Argissolo sob plantio direto nos teores de água friável e plástico coletadas e determinadas nos capítulos 3 e 4, foi feito um estudo sobre a relação entre esses.

5.3 Resultados e Discussão

Os valores de tensão de pré-adensamento versus índice de cone medido no campo para o Argissolo são apresentados na fig. 12. Há uma relação significativa positiva e linear entre a tensão de pré-adensamento e o índice de cone de campo, ou seja, um incremento do índice de cone de campo foi associado a maiores valores de tensão de pré-adensamento, o que está de acordo com estudos desenvolvidos por Culley e Larson (1987), Mosaddeghi et al. (2003) e Lima (2004).

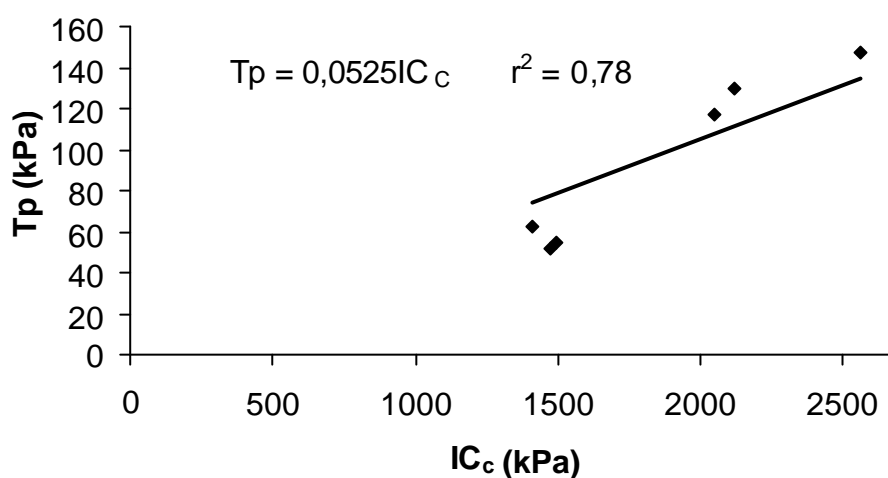


Figura 12 – Tensão de pré-adensamento (T_p) versus índice de cone medido em campo (IC_c) no Argissolo.

A função de pedotransferência apresentada na fig. 12 que define o comportamento da tensão de pré-adensamento em função do índice de cone em campo no Argissolo estudado explicou 78% da variabilidade da tensão de pré-adensamento.

Como um dos princípios norteadores do desenvolvimento dessa tese foi o de gerar conhecimento com formatação de fácil utilização por parte de técnicos de campo e agricultores, optou-se pela escolha de uma função de pedotransferência da tensão de pré-adensamento versus índice de cone de campo linear e que passasse pela origem dos eixos em detrimento de outra que apresenta-se um r^2 melhor

Com base na fig. 12 verificou-se uma relação entre o índice de cone de campo e tensão de pré-adensamento. Essa relação para as condições do Argissolo estudado é de IC_c:T_p de 19:1.

A relação aqui encontrada difere de outros estudos como a de 10:1 apresentada por Canarache, Horn e Colibas (2000) e Mosaddeghi et al. (2003) ou de 17:1 apresentada por Lima (2004). Essa diferença pode ter ocorrido em função da textura diferente entre os solos estudados. Já que Canarache, Horn e Colibas (2000) trabalharam com solo de textura muito argilosa e Mosaddeghi et al. (2003) com solos de textura franco argilo siltoso.

Para Lima (2004) o motivo da diferença apresentada entre os estudos está relacionada com a textura do solo. O teor de argila exerce efeito sobre o comportamento compressivo dos solos. Solos com predomínio da fração argila possuem maior capacidade de suporte do que aqueles com predominância da fração areia.

O teor de água no solo é um fator amplamente reconhecido como determinante do processo de resistência à penetração e compressão originando a intensidade da deformação de um solo. O teor de água atua como lubrificante entre as partículas, reduzindo a resistência à penetração, permitindo o deslocamento das mesmas, sendo esse deslocamento favorecido à medida que há incremento do teor de água no solo. Esse incremento também origina uma redução do número de contatos entre as partículas diminuindo as forças de ligação entre elas e por sua vez reduzindo a capacidade de suporte de carga do solo

A função de pedotransferência desenvolvida para o Argissolo estudado é de grande utilidade, uma vez que permite estimar a tensão de pré-adensamento, ou seja, a capacidade de suporte de carga do solo, com base na determinação da resistência à penetração, a qual é de rápida verificação no campo. Através do conhecimento prévio da tensão de pré-adensamento, pode-se monitorar e planejar o tipo de tráfego, de maquinário e sistema a ser utilizado em uma área agrícola, em função do valor da teor de água, evitando-se a compactação adicional na área.

Portanto verifica-se que para o Argissolo sob plantio direto, em teores de água que caracterizam seu estado plástico e/ou friável a relação entre o índice de cone de campo e a tensão de pré-adensamento vem a ser de 19:1. Dessa forma, com base na avaliação do índice de cone de campo e o respectivo teor de água no solo torna-se possível estimar a sua capacidade de suporte, de forma bastante rápida.

5.4 Conclusões

A predição da tensão de pré-adensamento do solo com base na propriedade índice de cone é possível. O índice de cone pode ser utilizado para a determinação rápida da tensão de pré-adensamento do solo sem a necessidade da realização do ensaio de pré-adensamento.

O modelo de capacidade de suporte de carga do Argissolo pode ser expresso pela função $T_p = 0,0525IC_C$, em que T_p é a tensão de pré-adensamento e IC_C é o índice de cone do campo.

A relação entre o índice de cone de campo e a tensão de pré-adensamento para o Argissolo estudado é de 19:1, ou seja, o valor do índice de cone é 19 vezes maior que o da tensão de pré-adensamento.

Os efeitos das operações mecanizadas no Argissolo podem ser quantificadas pela função de pedotransferência da capacidade de suporte de carga, e seu uso, permite prever e quantificar os efeitos do tráfego na compactação do solo.

6 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE UM ARGISSOLO COM BASE NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E TEOR DE ÁGUA NO SOLO

6.1 Introdução

A capacidade do solo em resistir à deformação depende do teor de água, textura e distribuição de seus agregados.

O teor de água, no momento em que ocorre a pressão, é um fator determinante da intensidade de compactação. Ashburner e Sims (1984), explicam que se um solo estiver com baixo teor de água, apresentará elevada resistência proporcionando pouca deformação antes de haver modificações na sua estrutura. No estado friável, a deformação é proporcional à carga aplicada e revertida rapidamente quando o carregamento é removido sem ter sido atingida a tensão de pré-adensamento. Já quando o solo apresenta elevado teor de água, estado plástico, ele deforma-se lentamente em função da carga aplicada não havendo reversão quando esta é removida.

A faixa de teor de água em que os solos se encontram no estado friável é balizada por seus Limites de Contração e Plasticidade. Os estados de consistência dependem dos mesmos fatores que a sua capacidade à deformação, mas no caso de um solo específico o fator teor de água é o mais importante.

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para a determinação do teor de água do Argissolo através do tato e aparência correlacionando com a determinação da capacidade de suporte e do índice de cone do solo.

6.2 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido na propriedade da família Junkherr, localizada no Município de Rio Pardo, na localidade de Rincão del Rei, no estado do Rio Grande do Sul, 29°52'03" latitude sul e 52°22'38" longitude oeste, altitude de 92m, região fisiográfica da Depressão Central. Nesta região, o tipo climático dominante é o Cfa na classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.604,1mm.

O solo da propriedade é classificado como Argissolo Vermelho distrófico latossólico (EMBRAPA, 1999), unidade de mapeamento Rio Pardo. Os Argissolos são solos geralmente profundos a muito profundos e bem drenados (STRECK et al., 2002).

Foi utilizada uma área de 30 m x 50 m (1.500 m²), dentro de um campo que tem sido cultivado a mais de 20 anos sendo que nos últimos 5 anos com soja e/ou milho em plantio direto. Para a caracterização da umidade do solo foram coletadas amostras deformadas na profundidade 0,10 m a 0,20 m em dez pontos diferentes, os mesmos em que foram determinadas a tensão de pré-adensamento, descrita anteriormente nessa tese, sendo a coleta realizada em fevereiro de 2008.

As amostras passaram, depois de secas ao ar, por peneira de malha de 2,0mm de abertura, logo após o material foi colocado em estufa à 105°C até peso constante.

Das amostras secas em estufa foram retiradas sub-amostras com 0,06 kg, e adicionado água com a finalidade de proporcionar os teores de água e estados de consistência conforme tab. 5.

Tabela 5 – Teor de água no solo em Argissolo submetido a plantio direto e estado de consistência.

Ug		Estado Consistência do Solo
(kg.kg ⁻¹)	(%)	
0,02	2	Seco
0,10	10	Friável
0,17	17	Plástico
0,28	28	Líquido

Para a escolha dos valores de teor de água utilizou-se como base os Limites de Atterberg (tab. 6) determinados para o solo em estudo.

As amostras nos seus respectivos teores de água foram comprimidas manualmente, fazendo-se um registro fotográfico e uma descrição da sensação ao tato, com a finalidade de caracterizá-la sob o ponto de vista do tato e aparência, no respectivo teor de água.

Tabela 6 – Limites de Atterberg para Argissolo Vermelho distrófico latossólico, classe textural Franco Argilo Arenoso.

Limites de Atterberg	(kg.kg⁻¹)	(%)
Limite Superior de Plasticidade	0,228	22,8
Limite Inferior de Plasticidade	0,135	13,5
Limite Seco	0,10	10,0
Índice de Plasticidade	0,093	9,3

6.3 Resultados e Discussão

Através dos testes desenvolvidos observaram-se diferenças nas amostras de solo nos distintos teores de água.

Essas diferenças se deveram, principalmente com relação à sensação de aderência à mão, de fragmentação, força de ligação entre as partículas e coloração.

A seguir são apresentadas a aparência e a descrição do Argissolo Vermelho distrófico latossólico, classe textural Franco Argilo Arenoso estudado, em cada teor de água avaliado.

O solo quando em seu estado de consistência seco, com teor de água de 0,02 kg.kg⁻¹ (2%), fig. 13, ao ser manuseado com a mão (comprimir 3 vezes) apresenta a sensação de seco, granulado com pequenos agregados soltos, não proporciona ligação entre os grãos e/ou agregados depois de individualizados, não sendo possível a formação de uma massa uniforme quando comprimido na mão.

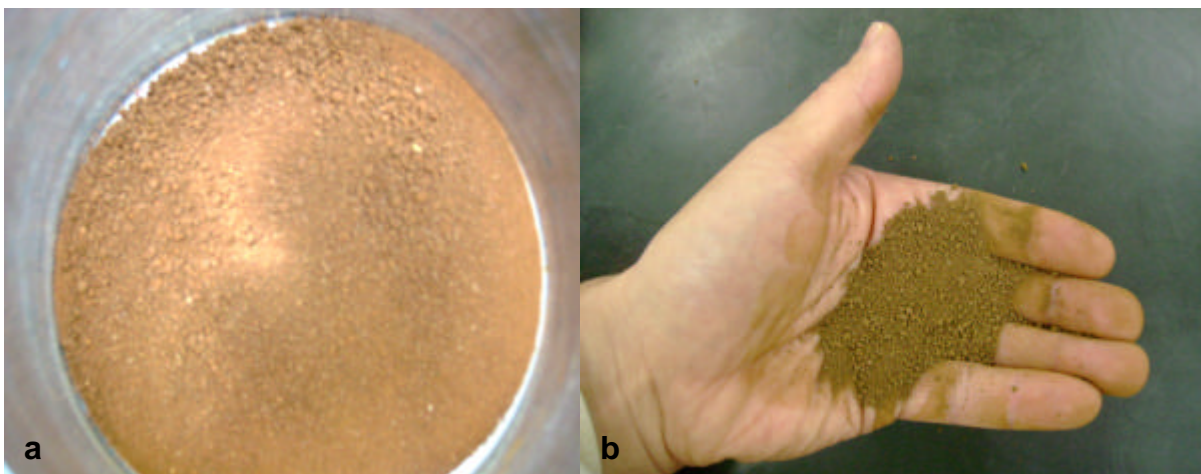


Figura 13 – Aparência do solo no estado de consistência seco, com teor de água de $0,02 \text{ kg.kg}^{-1}$ (2%): a) antes de ser manipulado; b) quando manipulado com a mão.

No seu estado friável, com teor de água de $0,10 \text{ kg.kg}^{-1}$ (10%), fig. 14, apresenta a sensação de suavemente úmido, sentem-se os pequenos agregados, ocorre a ligação entre grãos e/ou agregados mesmo depois de individualizados, quando comprimido na mão (3 vezes) forma uma massa disforme, mas solta pequenos agregados e grãos com facilidade, não é capaz de deixar mancha de umidade na mão, coloração escura em comparação com o solo seco.



Figura 14 – Aparência do solo no estado de consistência friável, com teor de água de $0,10 \text{ kg.kg}^{-1}$ (10%): a) antes de ser manipulado; b) quando manipulado com a mão.

Estando em seu estado de consistência plástico, com teor de água de $0,17 \text{ kg.kg}^{-1}$ (17%), fig. 15, proporciona a sensação de úmido, ligação entre grãos e/ou agregados mesmo depois de individualizados, quando comprimido com a mão (3 vezes) apresenta-se sob a forma de uma massa homogênea disforme, soltando pouquíssimos agregados, ao ser pressionado com os dedos contra a palma da mão

mostra a marca definida dos dedos, formando cinta fraca quando comprimido entre o polegar e o indicador. Oferece aderência à mão deixando mancha de umidade na mesma, apresenta também coloração escura em comparação com o solo no estado seco.

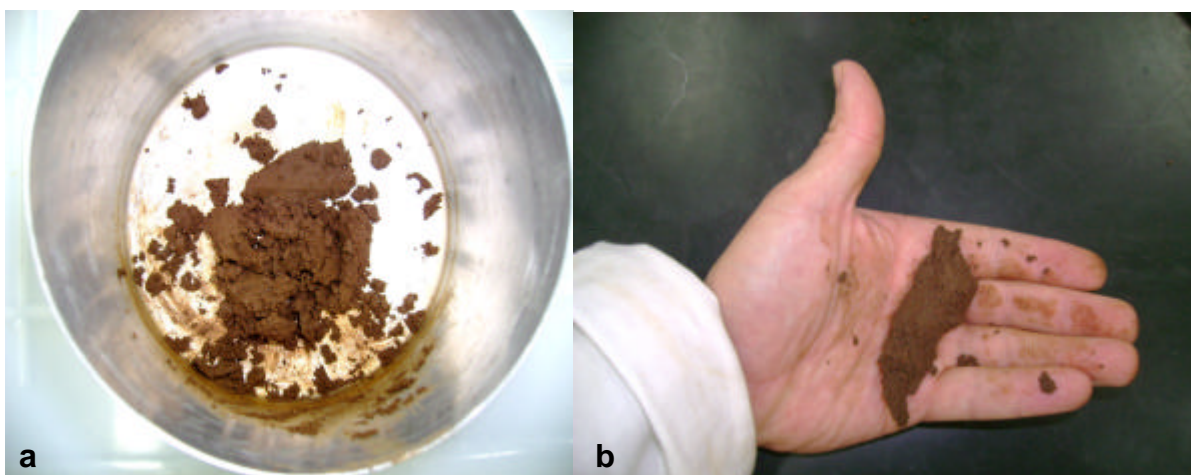


Figura 15 – Aparência do solo no estado de consistência plástico, com teor de água de $0,17 \text{ kg.kg}^{-1}$ (17%): a) antes de ser manipulado; b) quando manipulado com a mão.

No estado de consistência líquido, com teor de água $0,28 \text{ kg.kg}^{-1}$ (28%), fig. 16, apresenta a sensação molhada, quando pressionado entre os dedos sendo possível individualizar os grãos de areia, forma uma massa homogênea e fluida, ao ser comprimido (1 vez) com a mão nota-se a água na sua superfície, deixa também uma película aderente a mão e coloração escura em comparação com o solo em seu estado seco.

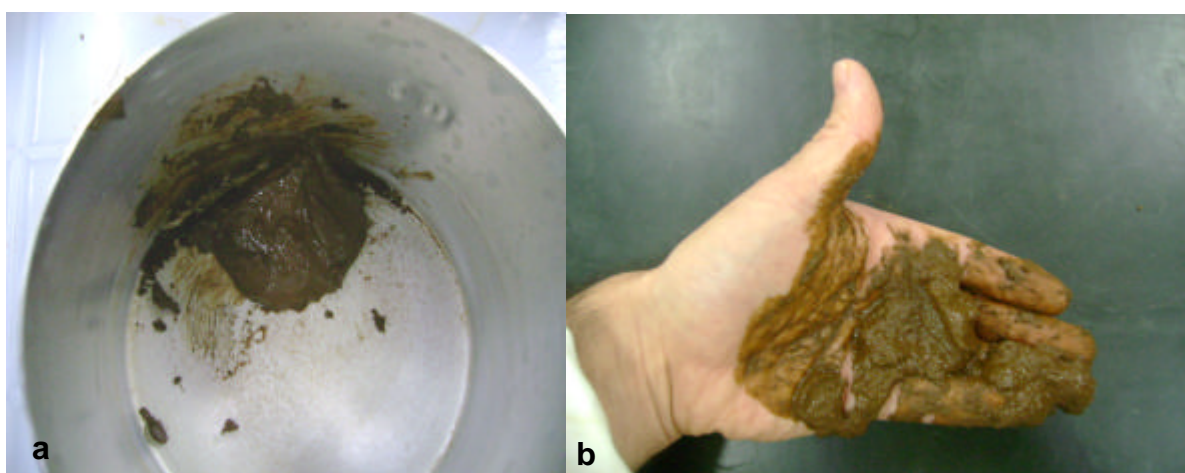


Figura 16 – Aparência do solo no estado de consistência líquido, com teor de água de $0,28 \text{ kg.kg}^{-1}$ (28%): a) antes de ser manipulado; b) quando manipulado com a mão.

Sugere-se para a realização da determinação do teor de água, através do tato e aparência em campo, coletar uma pequena amostra de solo fragmentada da camada que se deseja realizar a determinação e proceder como descrito anteriormente.

A seguir são apresentadas sugestões de metodologia para determinação da capacidade de suporte de carga do Argissolo, ou seja, tensão de pré-adensamento do Argissolo, em função de informações como teor de água estimado, índice de cone de campo e a determinação do índice de cone através da obtenção do teor de água do solo.

Com base na metodologia de verificação do teor de água através do tato e aparência descrito anteriormente e da função que relaciona a tensão de pré-adensamento com teor de água para o Argissolo, apresentada no capítulo 3, através da tab. 7 pode-se estimar a tensão de pré-adensamento sabendo-se a faixa do teor de água do solo para os estados de consistência do solo.

Tabela 7 – Valores de T_p em função dos estados de consistência do solo.

T_p (kPa)	Consistência do Solo	U_g (kg.kg^{-1})
> 195,78	seco	< 0,10
195,78 – 106,23	friável	0,10 – 0,135
106,23 – 36,52	plástico	0,135 – 0,228

A tab. 7 pode ser utilizada nas situações onde se conhece a função que relaciona tensão de pré-adensamento e teor de água, sendo necessário apenas a estimativa do teor de água ou estado de consistência do Argissolo através da sensação ao tato e aparência.

Aplicando-se a determinação do índice de cone de campo através de penetrógrafo de campo e a função que relaciona tensão de pré-adensamento e índice de cone de campo para o Argissolo apresentada no capítulo 5, através da tab. 8 estima-se a tensão de pré-adensamento sabendo-se o índice de cone de campo, visto que a relação entre o índice de cone de campo e a tensão de pré-adensamento é de 19:1.

Nas situações onde se dispõe de um penetrógrafo de campo e com o valor do índice de cone de campo mensurado através deste equipamento pode utilizar-se a

tab. 8 para determinar a tensão de pré-adensamento do Argissolo ou aplicar a relação de 19:1 entre índice de cone de campo e tensão de pré-adensamento.

Aplicando-se a metodologia de determinação do teor de água através do tato e aparência e da função que relaciona índice de cone de campo e o teor de água para o Argissolo apresentada no capítulo 4, através da tab. 9 pode-se estimar o índice de cone de campo sabendo-se a faixa do teor de água do solo.

Tabela 8 – Valores de T_p em função de IC_C do Argissolo.

T_p (kPa)	IC_C (kPa)
13,25	250
26,25	500
39,38	750
52,50	1000
65,63	1250
78,75	1500
91,88	1750
105,00	2000
118,13	2250
131,25	2500
144,38	2750
157,50	3000

Tabela 9 – Valores de IC_C em função dos estados de consistência e U_g do Argissolo.

IC_C (kPa)	Consistência do Solo	U_g ($kg.kg^{-1}$)
> 4.846,15	seco	< 0,10
4.846,15 – 2.064,71	friável	0,10 – 0,135
< 2.064,71	plástico	> 0,135

Utiliza-se a tab. 9 nas situações onde se conhece a função que relaciona índice de cone de campo e teor de água, sendo necessário apenas a estimativa do teor de água ou estado de consistência do Argissolo através da sensação ao tato e aparência.

O agricultor de posse e uso dessas informações poderá fazer um melhor planejamento do trabalho com máquinas agrícolas sobre o Argissolo, dessa forma preservando principalmente a sua qualidade física.

6.4 Conclusões

A metodologia de determinação do teor de água do solo através do tato e aparência proposto pode ser utilizada como ferramenta para a caracterização rápida do Argissolo, de sua tensão de pré-adensamento e índice de cone de campo.

7. CONCLUSÕES GERAIS

Através deste trabalho confirmou-se que a relação entre a capacidade de suporte de um solo, teor de água e resistência à penetração, pode levar ao desenvolvimento de uma metodologia simplificada de análise deste parâmetro.

Foi possível a determinação da capacidade de suporte de carga do Argissolo a partir do seu índice de cone de campo, para diferentes teores de água do solo.

As funções de pedotransferência desenvolvidas neste trabalho permitem a avaliação, o monitoramento e o controle da qualidade física do solo.

8. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Desenvolver pesquisas sobre relações entre tensão de pré-adensamento, índice de cone e teor de água para Argissolo e outros solos do Estado do Rio Grande do Sul sob diversos sistemas de manejo;

Desenvolver estudos relacionando a pressão de contato pneu-solo com a tensão de pré-adensamento do solo, sob diferentes sistemas de uso e manejo.

Desenvolver pesquisas comparando a determinação do índice de cone do solo em campo e em laboratório em diferentes teores de água.

9. REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **MB-3336 – Solo – Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 1990. 15p.

ANDREOLA, V. R. M.; CARDOSO, D. L.; GABRIEL FILHO, A.; TABILE, R. A.; TOLEDO, A. de; CHIMBIDA, J. T. Tensão-deformação de um Latossolo sob pastejo com diferentes condições de umidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais do...** João Pessoa: SBEA, 2006. 1 CD-ROM.

ARAÚJO, A. A. **Forrageira para ceifa: capineiros, pastagens, fenação e ensilagem**. 3.ed. Porto Alegre: Sulina, 2001. 176p.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 28, p. 337-345, 2004.

ASHBURNER, J. E.; SIMS, B. G. **Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza**. San José: IICA, 1984. 437p.

AZEVEDO, L. P., SIQUEIRA, R., MONICE FILHO, R. G. Densidade do solo e resistência à penetração em sistemas de plantio direto e convencional de soja (*Glycine max* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Fortaleza. **Anais do...** Fortaleza: SBEA, 2000. 1 CD-ROM.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Física de suelos**. 4.ed. Mexico: Editorial Hispano Americana, 1972. 529p.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evolution. In: STEWART, B. A., ed. **Advances in soil science**. New York, springer Verlag. v.9, p.177-213, 1989.

BUSSCHER, W. J.; FREDERICK, J. R.; BAUER, P. J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 999-1003, 2000.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil and Tillage Research**, v. 56, p. 185-196, 2000.

CANARACHE, A.; TRANDAFIRESCU, T.; COLIBAS, I. HOROBEANU, I.; PATRU, V.; SIMOTA, H.; TRANDAFIRESCU, T. Effect of induced compaction by wheel traffic on soil physical properties and yield of maize in România. **Soil & Tillage Research**, v. 4, p. 199-213, 1984.

CAPELLESSO, Adnor José ; RODRIGUES, Caroline Moreira ; RIEFFEL, Jorge de Ávila ; FONSECA, Leandro Andrade da ; ALMEIDA, Glauco Foster ; MACHADO, A. L. T. ; REIS, Ângelo Viera dos . Acuracidade de diferentes equações de previsão de área de contato pneu solo em solo preparado e não preparado. **In: XIV Congresso de Iniciação Científica - VII Encontro de Pós-Graduação - UFPel, 2005, Pelotas. Anais do XIV CIC - VII ENPÓS - UFPel, 2005. v. 1.**

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)–Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

COLLARES, Gilberto Loguercio. **Compactação em latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria

CULLEY, J. L. B.; LARSON, W. E. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p.562-567, 1987.

CURI, N., LARACH, J. O. I., KÄMPF, N., MONIZ, A. C., FONTES, L. E. F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.

DE MARIA, I. C., CASTRO, O. M., DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.23, p.703-709, 1999.

DE TOLDEO, A., TABILE, R. A., PEREIRA, J. O., GREJIANIN, R. L., ANDREOLLA, V. R. M., KONOPATZKI, M. R. S. Efeito do sistema de cultivo e da compactação na propriedade estrutural de um solo argiloso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais do ...João Pessoa: SBEA, 2006. 1 CD-ROM**

DEXTER, A.R., YOUNGS, I.M. Soil physic toward 2000. *Soil Till. Res.*, 24:101-106, 1992.

DIAS JÚNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 20, p. 175-182, 1996.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 imp. Rio de Janeiro: CNPS, 1999. 412p.

FERNÁNDEZ, B.; GALLOWAY, H. M. Efeito das rodas em propriedades físicas de dois solos. **Revista Ceres**, v. 34, p. 562-568, 1987.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, n. 48, p. 21-35, 1998.

GOMES, A.; PEÑA, Y. A. Caracterização da compactação através do uso do penetrômetro. **Lavoura Arrozeira**, v. 49, n. 1, p. 18-20, 1996.

GONTIJO, IVONEY. **Variabilidade especial do comportamento compressivo de dois Latossolo sob diferentes usos**. 2007. 120f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v. 6, p. 5-10, 1987.

HAKANSSON, I. Subsoil compaction caused by heavy vehicles a long-term threat to soil productivity. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v.29, p. 105-110, 1994.

HAKANSSON, I., MEDVEDEV, V. W. Protection of soil from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 35, p. 85-97, 1995.

HAKANSSON, I., REEDER, R. C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 29, p. 277-304, 1994.

HAKANSSON, I., VOORHEES, W. B., RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego: Academic, 1982. 365p.

IMHOFF, Silvia del Carmem. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

INNS, F. M., KILGOUR, J. Agricultural tyres. London: Dunlop Limited, 1978. 70p.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 130f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes métodos de manejo do solo e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, 1995.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L., SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

KOHNKE, H. **Soil physics**. New York: McGraw-Hill, 1968. 224p.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999.

LANÇAS, KLEBER PEREIRA. Diagnóstico e controle localizado da compactação do solo. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DO AGRONEGÓCIO DO ALGODÃO/ SEMINÁRIO ESTADUAL DA CULTURA DO ALGODÃO, 2000, Cuiabá. **Anais do...** Cuiabá: FAPAMT, 2000. p. 25-32.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v. 19, n. 2/3, p. 275-286, 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 60f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. SUZUKI, L. E. A. S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p.1765-1772, 2006.

MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, n. 109, p.41-73, 2002.

MACHADO, Andrea Liziane Coelho; MACHADO, Antonio Lilles Tavares. Análise da capacidade de suporte de três solos do Rio Grande do Sul quanto a pressão exercida pelos pneus de trator. In: XV Salão de Iniciação Científica - UFRGS, 2003, Porto Alegre. **Anais do XV Salão de Iniciação Científica - UFRGS, 2003**. v. 1.

MACHADO, Antonio Lilles Tavares. **Previsão do esforço de tração para ferramentas estreitas em solos do Rio Grande do Sul**. 2001. 172f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MACHADO, Antônio L. T.; REIS, Ângelo, V. dos; FERREIRA, Mauro F. P.; MACHADO, Roberto L. T.; MACHADO, Andréa L. C., BAUER, Gelson B. Influência da pressão de inflação do pneu do trator na resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Agrociência**. Pelotas, v. 11, n. 4, p. 481-486, 2005.

MACHADO, A. L. T.; TREIN, C. R. Determinação da compressibilidade em dois tipos de solos do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 3., 2000, Pelotas. **Anais do...** Pelotas: SBCS, 2000. 1 CD-ROM

MACHADO, A. L. T.; TREIN, C. R.; BICCA, A. V. D.. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletrônico. In: II Congresso latinoamericano de Ingenieria Rural - VI Congreso Argentino de Ingenieria Rural, 1998, La Plata. **Memórias...** La Plata : Ediciones Médicas Digitales, 1998.

MACHADO, A. L. T.; TREIN, C. R.; FERREIRA, M. F. P.; MACHADO, R. L. T. Compactação de dois tipos de solos em função da pressão de inflação dos pneus de trator e do teor de água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais do...** Canoas: SBEA, 2005. 1 CD-ROM

MACHADO, Roberto Lilles Tavares. **Efeito de um escarificador em parâmetros da relação solo-máquina em um planossolo**. 1995. 104f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

MAGALHÃES, R. P.; MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. C. Relação entre o índice de cone, teor de água, textura e matéria orgânica do solo em semeadura direta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais do...** Canoas: SBEA, 2005. 1 CD-ROM.

MEROTTO JR, A., MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 197-202, 1999.

MISRA, R. K. et al. Maximum axial and radial growth pressure of plant roots. **Plant and Soil**. Dordrecht, v. 98, p.315-326, 1986.

MOSADDEGHI, M. R., HEMMAT, A.; HAJABBASI, M. A.; ALEXANDROU, A. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally instable soil in central Iran. **Soil and Tillage Research**, v. 70, p. 53-64, 2003.

NAGAOKA, A. K., NETO CASTRO, P., BENEZ, S. H., LANÇAS, K. P. Resistência à penetração do solo na cultura da soja em diferentes tipos de manejos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Fortaleza. **Anais do...** Fortaleza: SBEA, 2000. 1 CD-ROM.

NEVENS, F.; REHEUL, D. The consequences of wheel – induce soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. **Soil and Tillage Research**, v. 70, p. 175-184, 2003.

OLIVEIRA, G. C. de; DIAS JÚNIOR, M. de S.; CURI, N.; RESECK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 27, p. 773-781, 2003.

OLIVEIRA, G. C. de; DIAS JÚNIOR, M. de S.; RESECK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 291-299, 2003.

OLIVEIRA, J. B., JACOMINE, P. K. T., CAMARGO, M. N. **Classes gerias de solos do Brasil – guia auxiliar para o seu reconhecimento**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.

PEREIRA, Joaquim O.; SIQUEIRA, Jair A. C.; URIBE-OPAZO, Miguel A.; SILVA, Suedênio de L. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n.1, p. 171-174, 2002.

PIKUL, J. L., RAMIG, R. E., WILKINS, D. E. Soil properties and crop yield among 4 tillage systems in a wheat pea rotation. **Soil & Tillage Research**, v. 26, p. 151-162, 1993.

PRADO, Renato de Mello; ROQUE, Cassiano Garcia; SOUZA, Zigomar Menezes de. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, 2002.

RIGHES, A. A.; AMARAL, L. G. H. do; COSTA, R. D.; ROSA, G. M. da; WILLES, J. A.; GOMES, A. C. dos S. **Determinação da água no solo e na planta para irrigação**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 2003. 97p.

SALIRE, E. V.; HAMMEL, J. E.; HARDCASTLE, J. H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, v. 31, p. 235-248, 1994.

SECCO, Deonir. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto**. 2003. 105f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. ; FERREIRA, F. P. Parâmetros de compressibilidade de um Latossolo influenciados pelo estado inicial de compactação e grau de saturação em água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais do...** João Pessoa: SBEA, 2006. 1 CD-ROM.

SILVA, A. P da; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, p. 1-10, 2008.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistema de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2485-2492, 2000.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; CARDOSO, V. M. F.; MIRANDA, E. É. V. de. Atributos físicos, mecânicos e dinâmicos do solo, como indicadores do impacto da cultura e do tráfego em perímetros irrigados. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 3, p. 384-401, jul-set. 2006.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 239-250, 2000.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. 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, n. 1, p. 1-8, 2002.

SIQUEIRA, R. **Sistemas de preparo em diferentes tipos de coberturas vegetais do solo**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Paulista, Botucatu.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. ½, p. 179-201, 1990.

SSSA (Soil Science Society of America): Glossary of Soil Science Terms. Disponível em: <https://www.soils.org/sssagloss/>. Acesso em: 13 out. 2007.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2002. 107.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 725-730, 2001.

THOMPSON, P. J., JANSEN, I. J., HOOKS, C. L. Penetrometer resistance and bulk density as parameters for predicting root system performance in mine soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p.1288-1293, 1987.

TREIN, C., LEVIEN, R., CEPIK, C., CONTE, O., DEBIASE, H. Resistência do solo à penetração em diferentes sistemas de manejo do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais do...** João Pessoa: SBEA, 2006. 1 CD-ROM.

USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). **Calculo de la humedad del suelo por tacto y apariencia**. Serviço de Conservación de Recursos Naturales. WashingtonDC: SCRN, 2000. 13p.

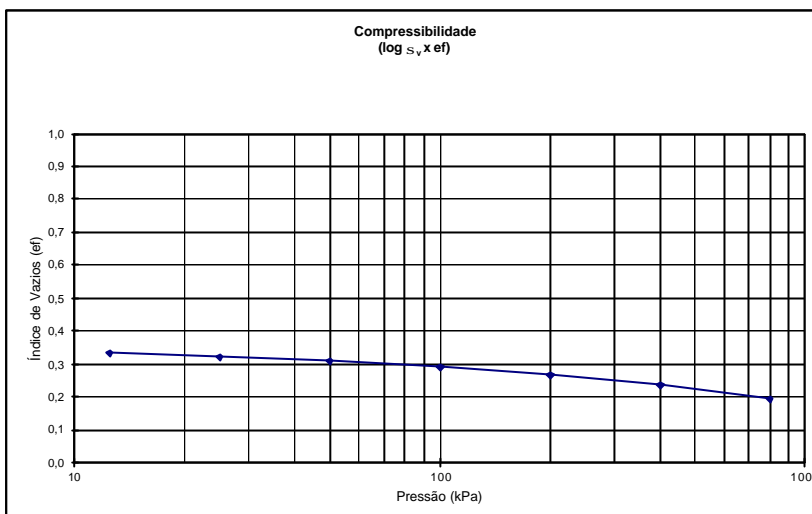
VAZ, C. M. P., HOPMANS, J. W. Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p.4-12, 2001.

VEIGA, M. da; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of na Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term. **Soil and Tillage Research**, n. 92, p. 104-113, 2007.

VOORHEES, W. B.; SENST, C. G.; NELSON, W. W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, p. 344-349, 1978.

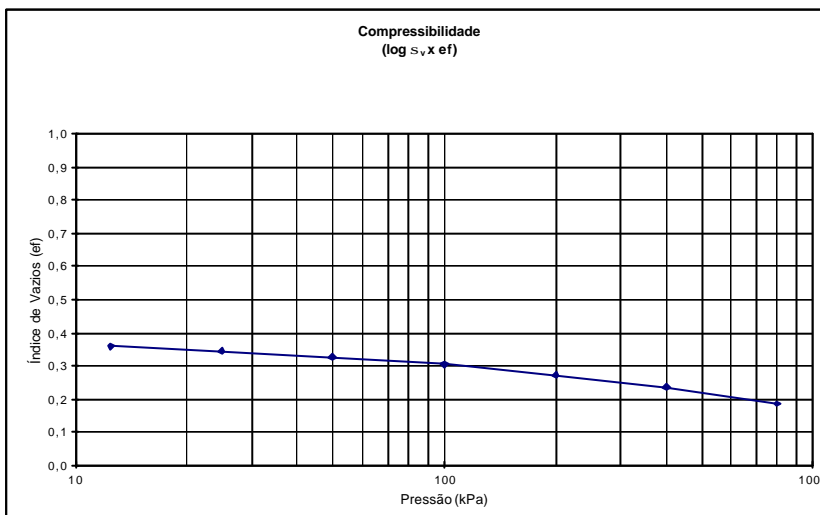
Apêndices

APÊNDICE 1 – Curvas de compressão do solo



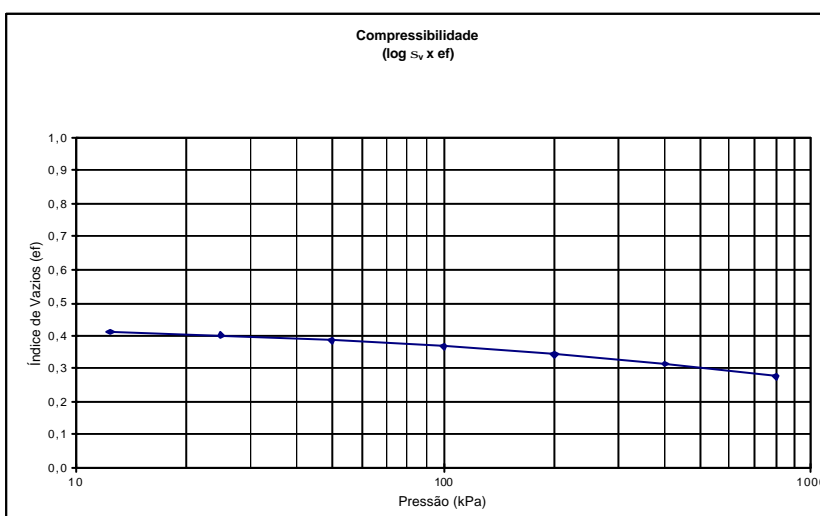
$T_p = 147,49 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1089 \text{ kg.kg}^{-1}$



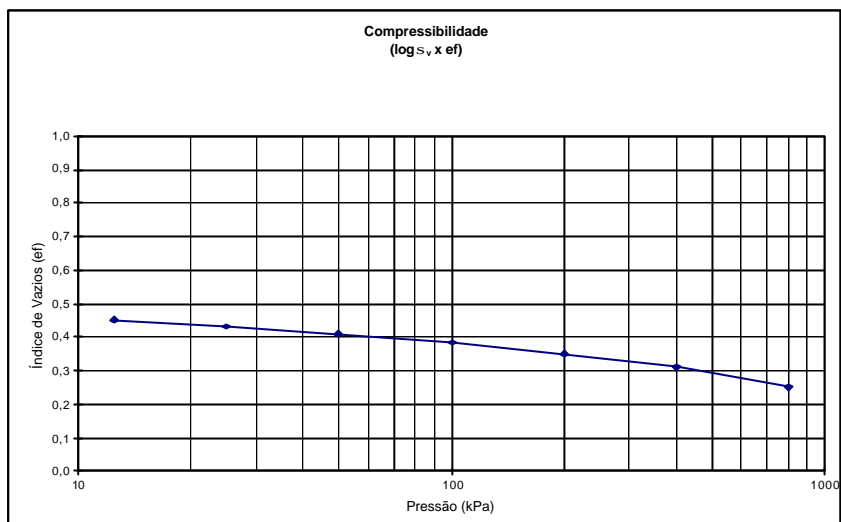
$T_p = 129,80 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1166 \text{ kg.kg}^{-1}$



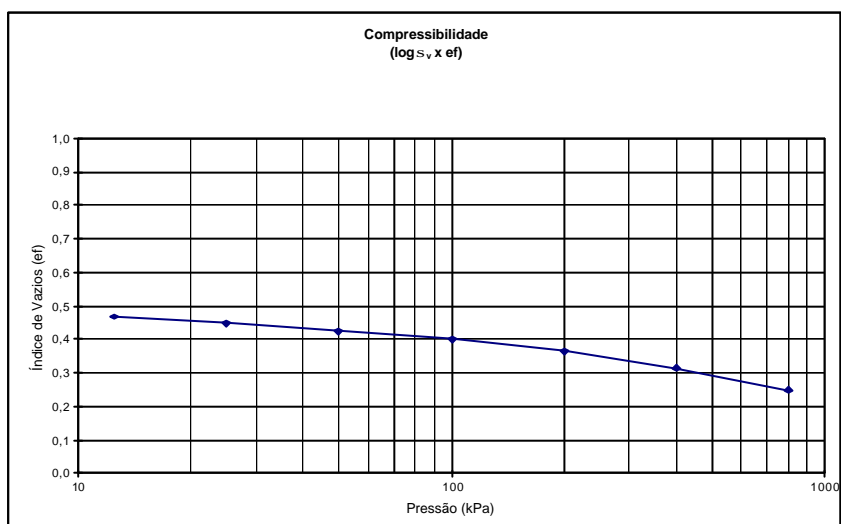
$T_p = 116,60 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1181 \text{ kg.kg}^{-1}$



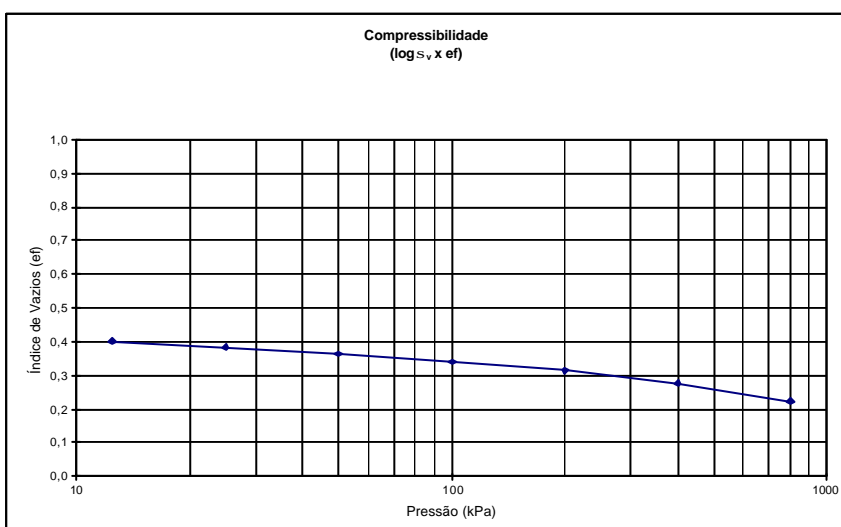
$T_p = 141,97 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1199 \text{ kg.kg}^{-1}$



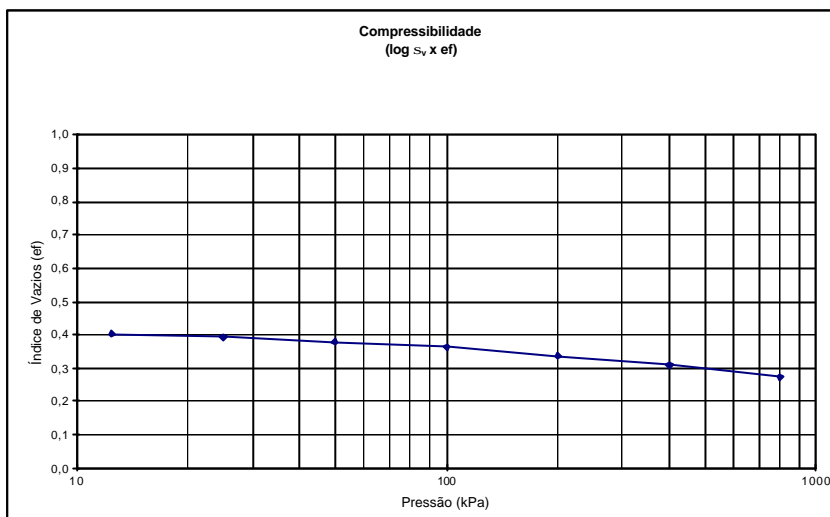
$T_p = 144,98 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1243 \text{ kg.kg}^{-1}$



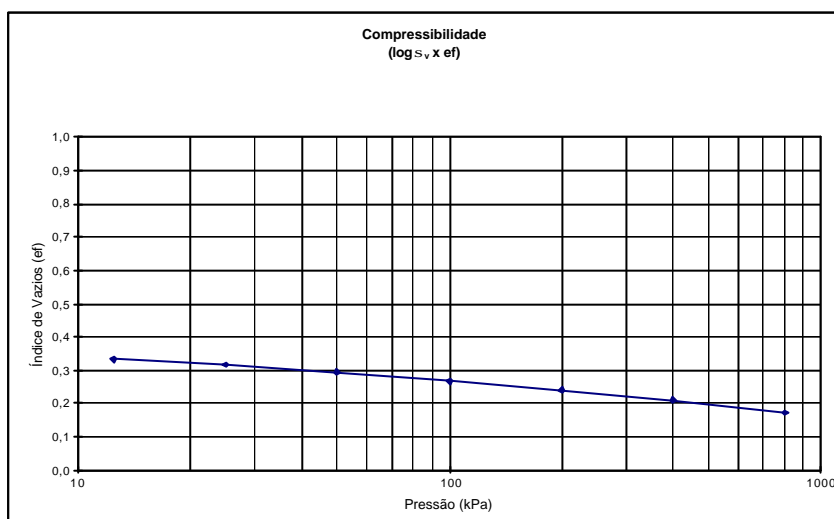
$T_p = 154,53 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1251 \text{ kg.kg}^{-1}$



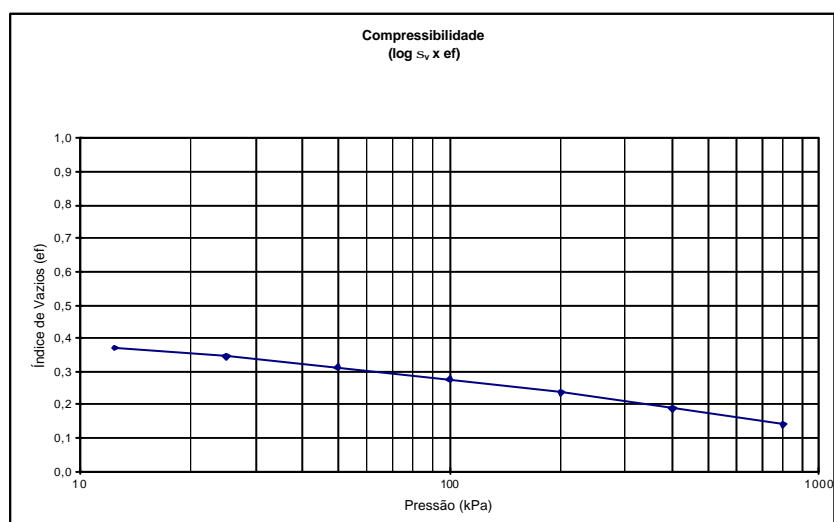
$T_p = 118,48 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1263 \text{ kg.kg}^{-1}$



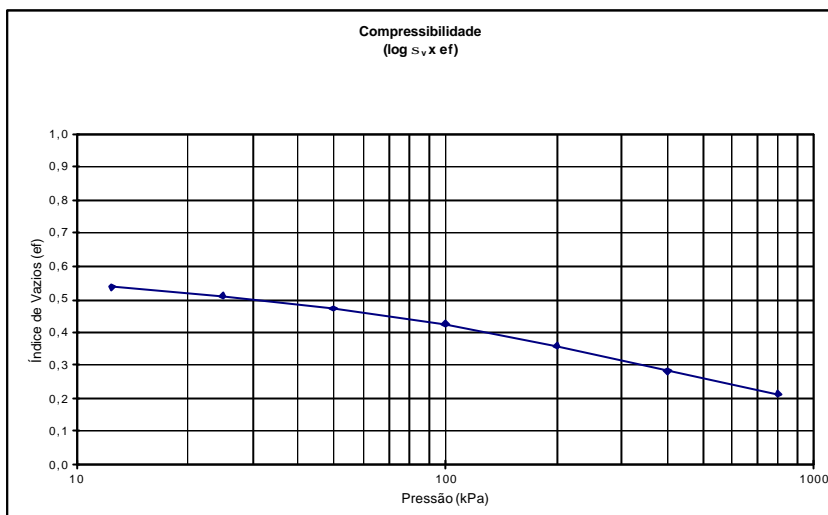
$T_p = 79,93 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1628 \text{ kg.kg}^{-1}$



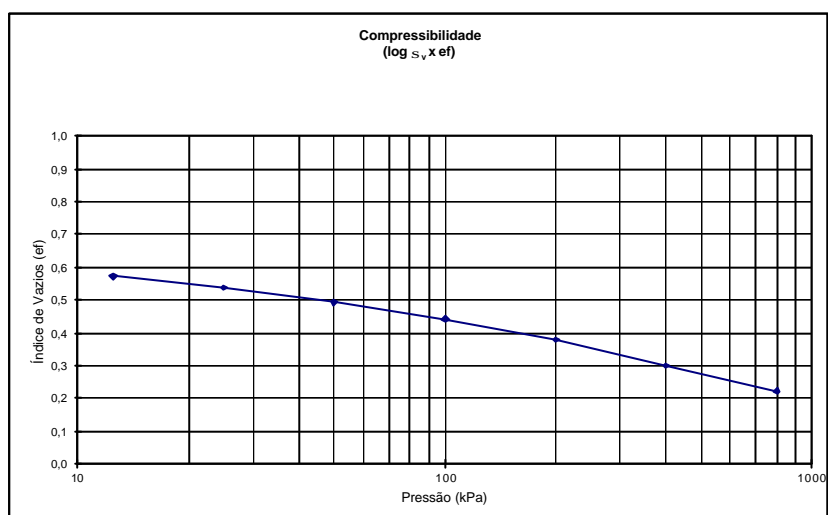
$T_p = 51,37 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1787 \text{ kg.kg}^{-1}$



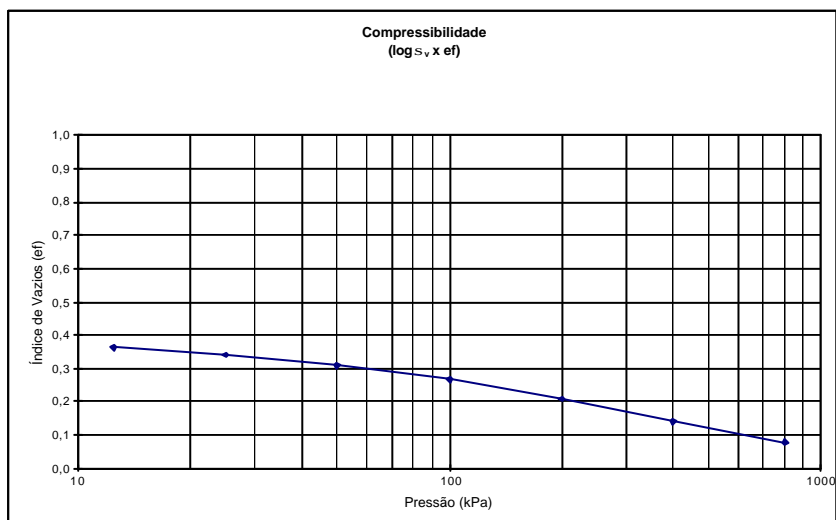
$T_p = 50,20 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1865 \text{ kg.kg}^{-1}$



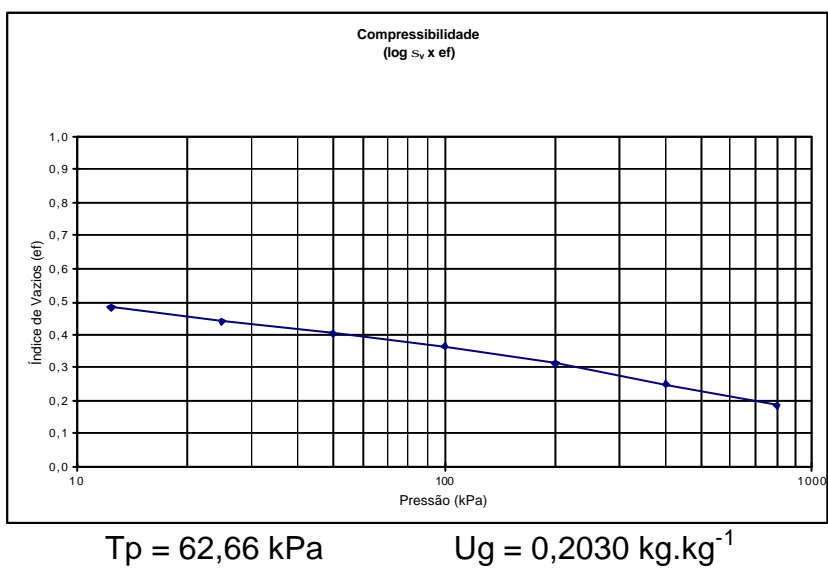
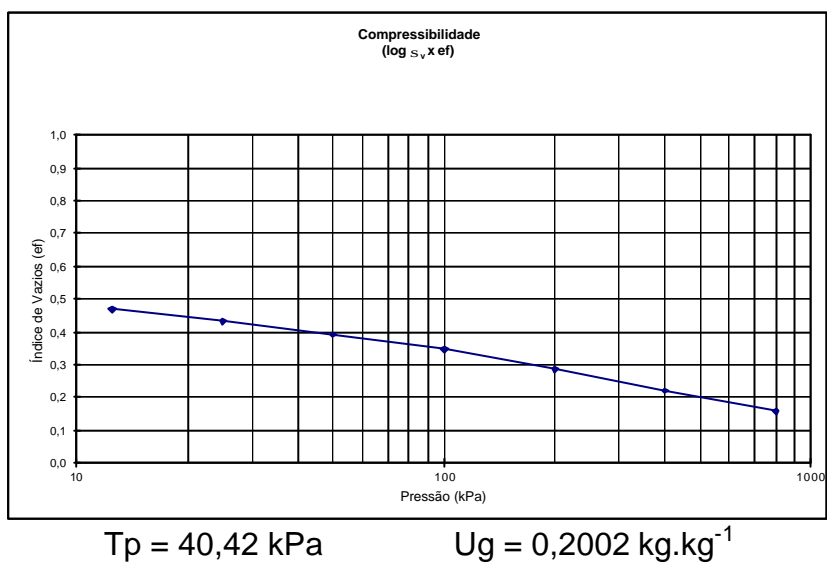
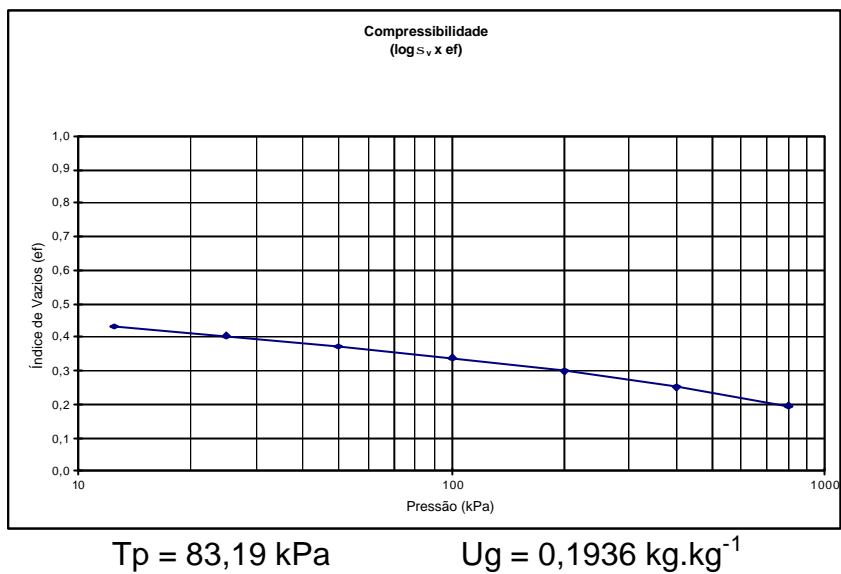
$T_p = 54,28 \text{ kPa}$

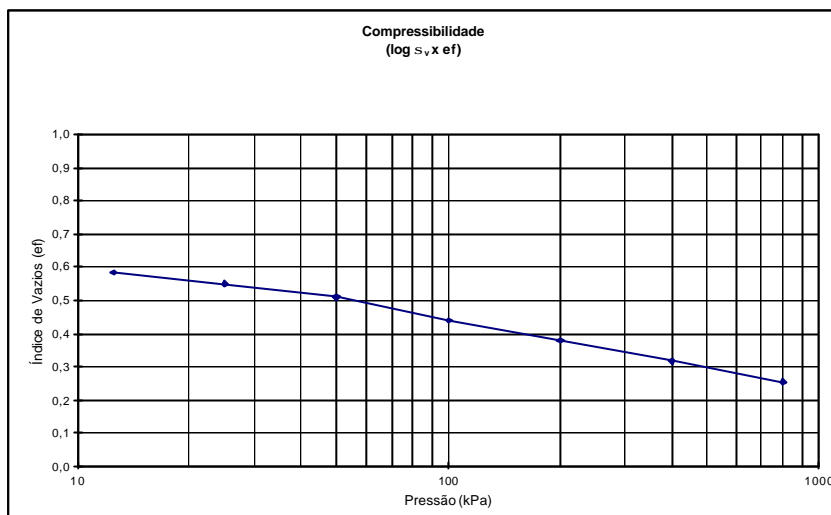
$U_g = 0,1873 \text{ kg.kg}^{-1}$



$T_p = 50,20 \text{ kPa}$

$U_g = 0,1928 \text{ kg.kg}^{-1}$





$$T_p = 27,31 \text{ kPa}$$

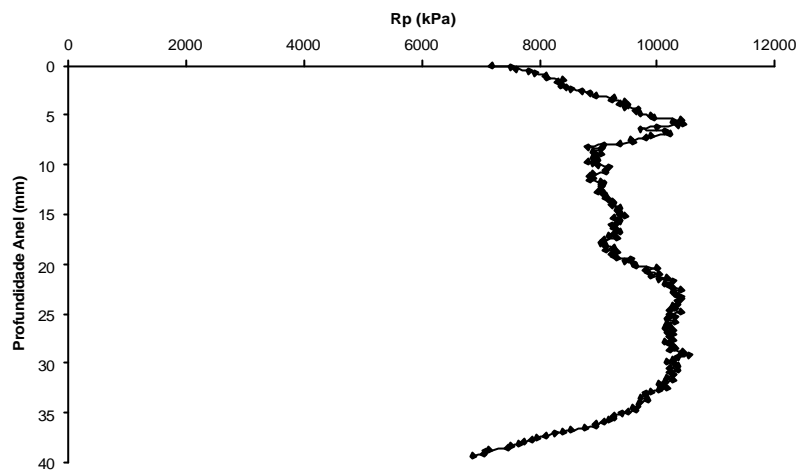
$$U_g = 0,2109 \text{ kg.kg}^{-1}$$

APÊNDICE 2 – Frações areia, silte e argila (kg.kg^{-1}) do solo e densidade de partículas do solo (kg.m^{-3})

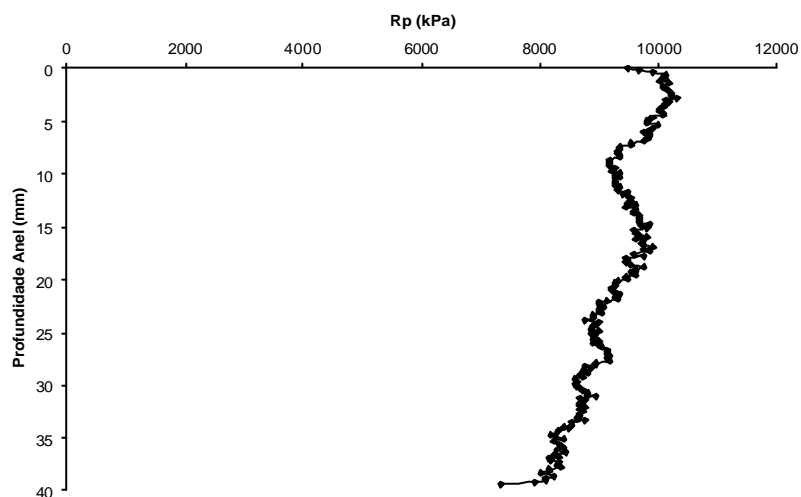
Amostra	Areia	Silte	Argila	Densidade de Partículas
1	0,5828	0,2262	0,1911	2.408,75
2	0,5401	0,2609	0,1990	2.495,95
3	0,4968	0,2806	0,2225	2.631,94
4	0,5152	0,2475	0,2374	2.608,33
5	0,4831	0,2761	0,2408	2.611,11
6	0,5155	0,2662	0,2183	2.649,30
7	0,5112	0,2740	0,2148	2.501,33
8	0,5226	0,2439	0,2335	2.573,97
9	0,4999	0,2736	0,2265	2.781,69
10	0,4783	0,2786	0,2431	2.683,10
Média	0,5146	0,2628	0,2227	2.594,55

APÊNDICE 3 – Microporosidade, macroporosidade e porosidade total ($\text{m}^3.\text{m}^3$) e densidade do solo (kg.m^{-3})

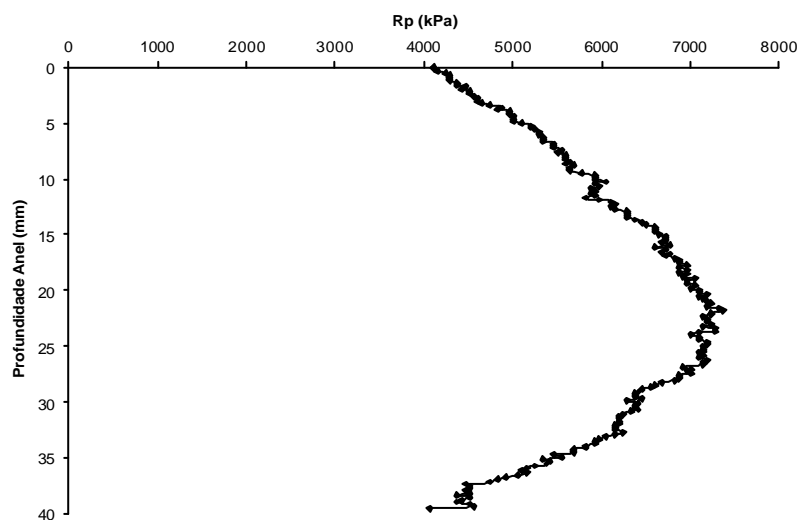
Amostra	Microporosidade	Macroporosidade	Porosidade Total	Densidade do Solo
1	0,28	0,03	0,32	1.744,78
2	0,27	0,03	0,30	1.797,12
3	0,25	0,03	0,28	1.863,86
4	0,27	0,03	0,30	1.807,95
5	0,24	0,03	0,27	1.839,77
6	0,3	0,03	0,33	1.709,74
7	0,26	0,05	0,31	1.774,52
8	0,29	0,05	0,34	1.706,97
9	0,28	0,03	0,31	1.729,10
10	0,28	0,02	0,30	1.876,66
Média	0,27	0,03	0,30	1.785,05

APÊNDICE 4 – Gráfico da variação da R_p em laboratório e IC_L determinado

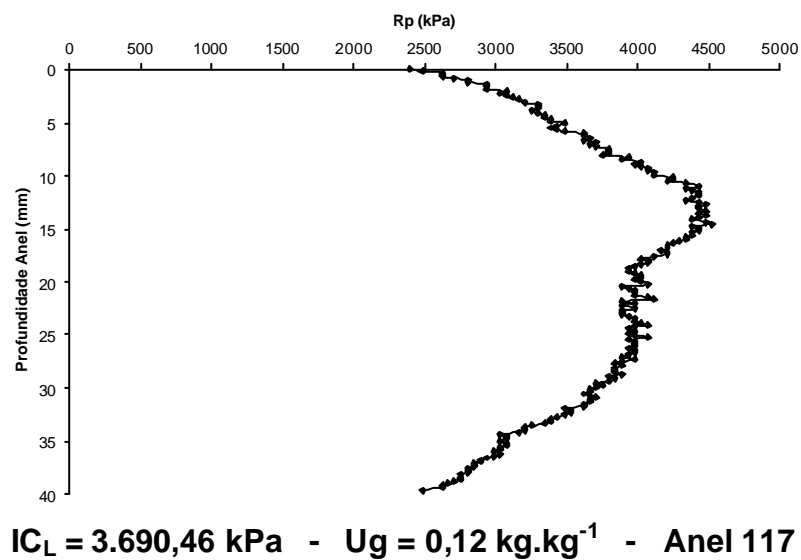
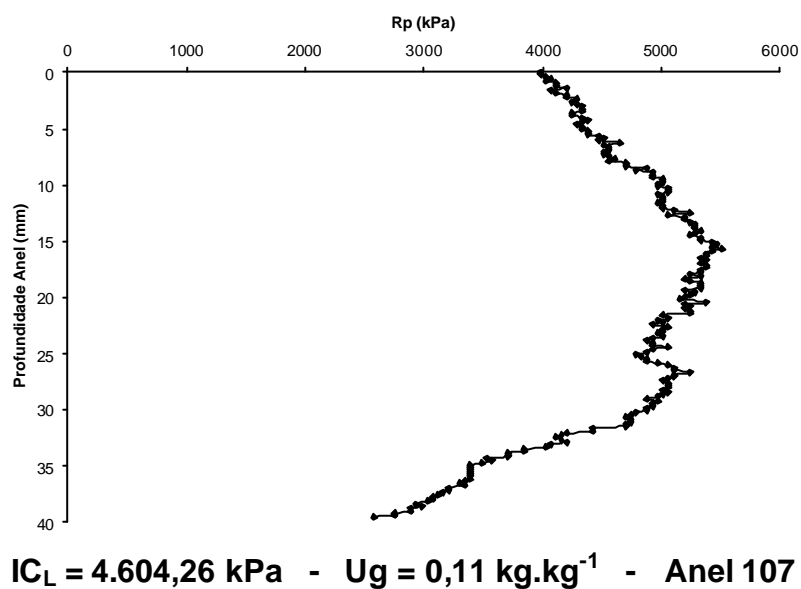
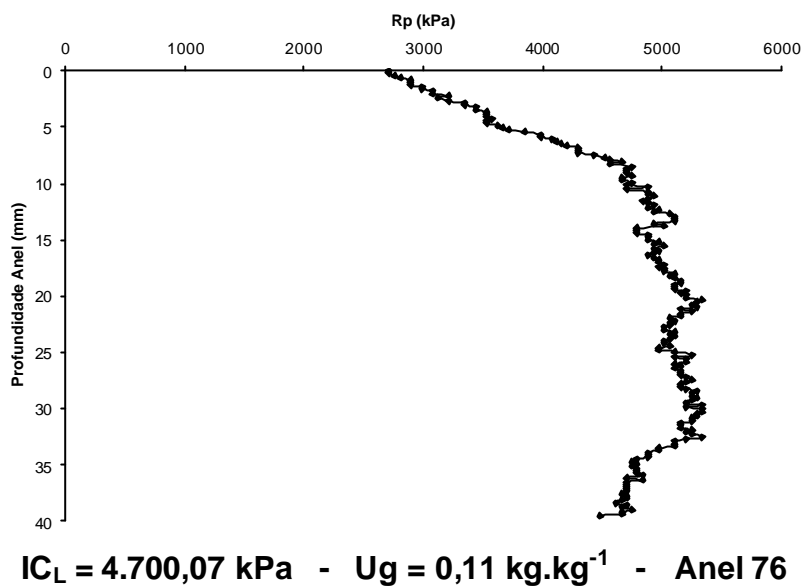
$IC_L = 9.420,92$ kPa - $U_g = 0,09$ kg.kg⁻¹ - Anel 108

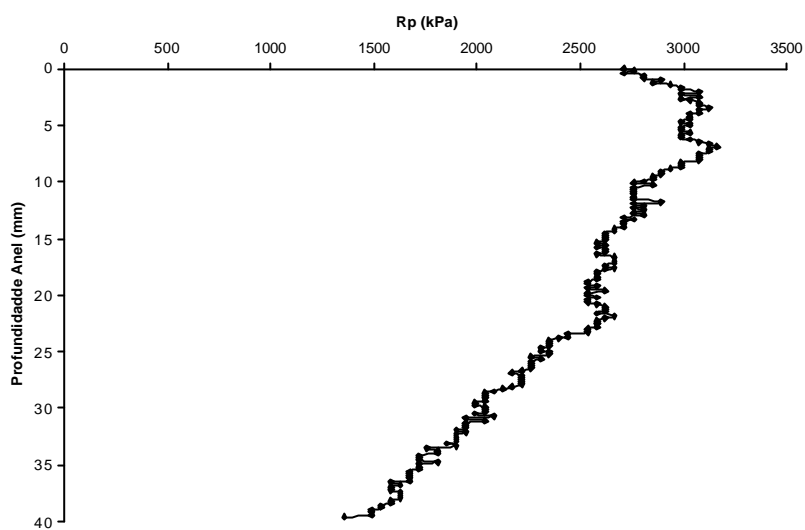


$IC_L = 9.207,52$ kPa - $U_g = 0,09$ kg.kg⁻¹ - Anel 162

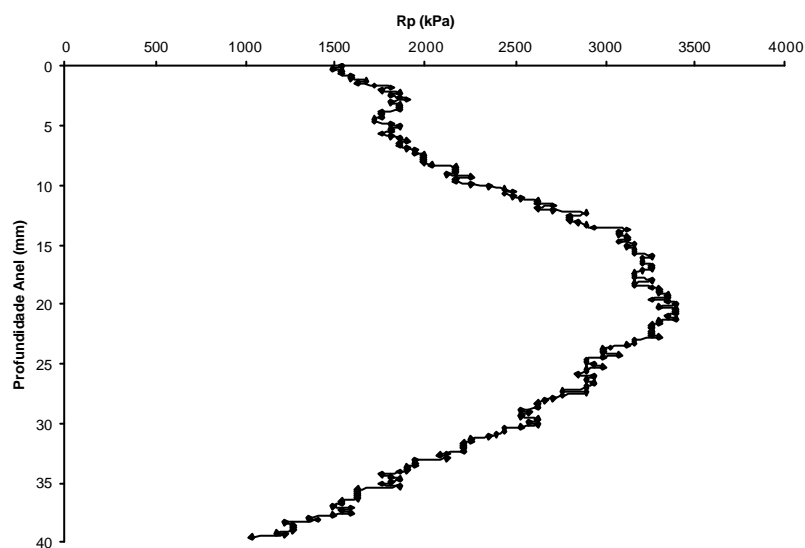


$IC_L = 6.003,60$ kPa - $U_g = 0,11$ kg.kg⁻¹ - Anel 103

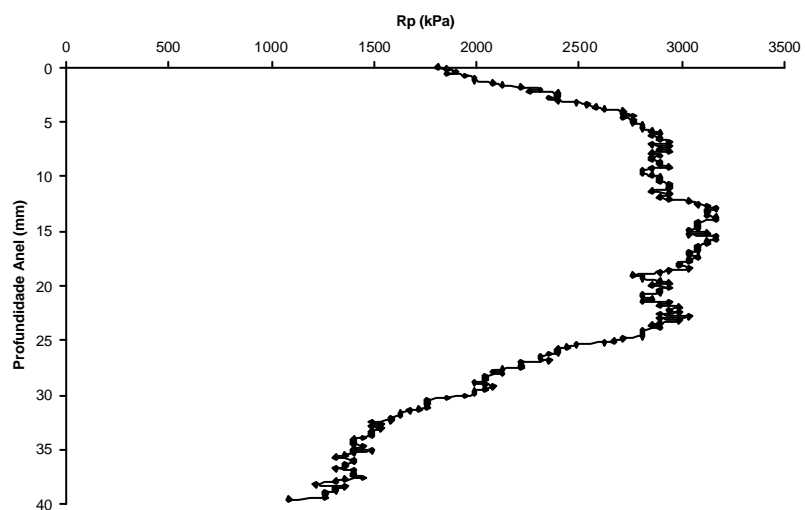




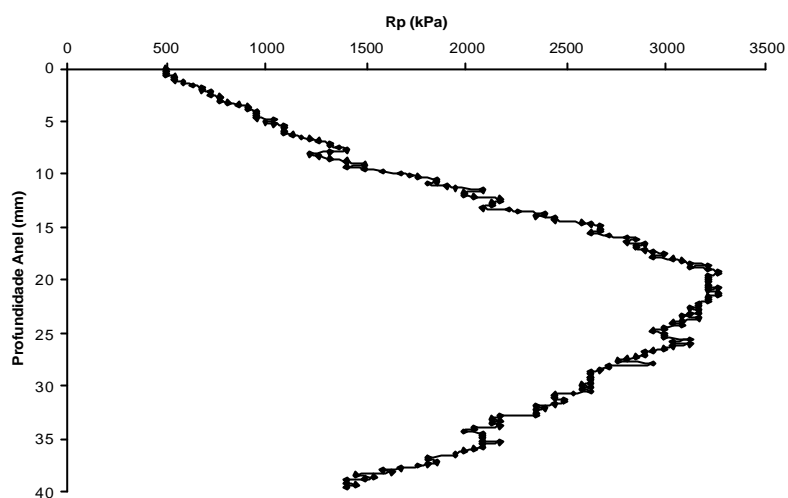
$IC_L = 2.443,14 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,10 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 101



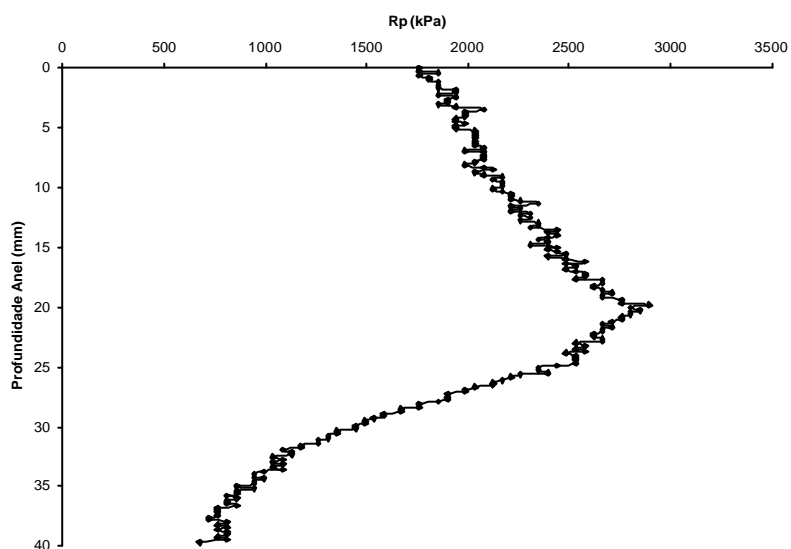
$IC_L = 2.417,05 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 200



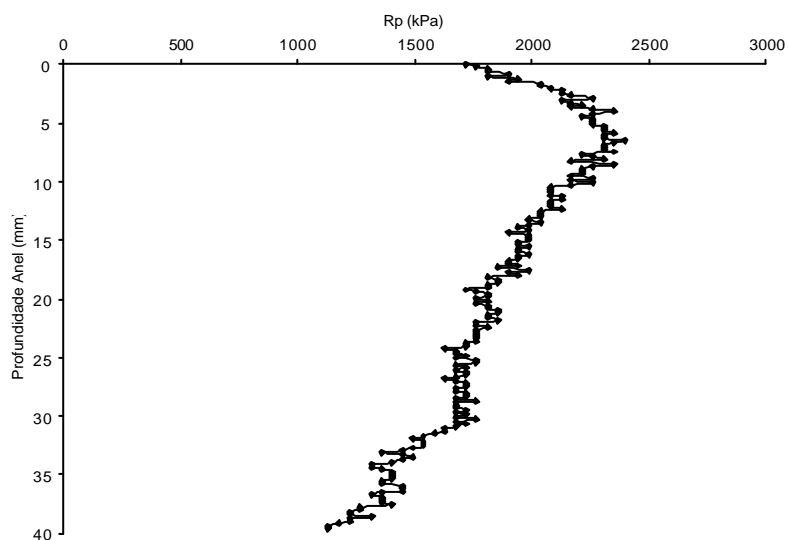
$IC_L = 2.410,38 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 142



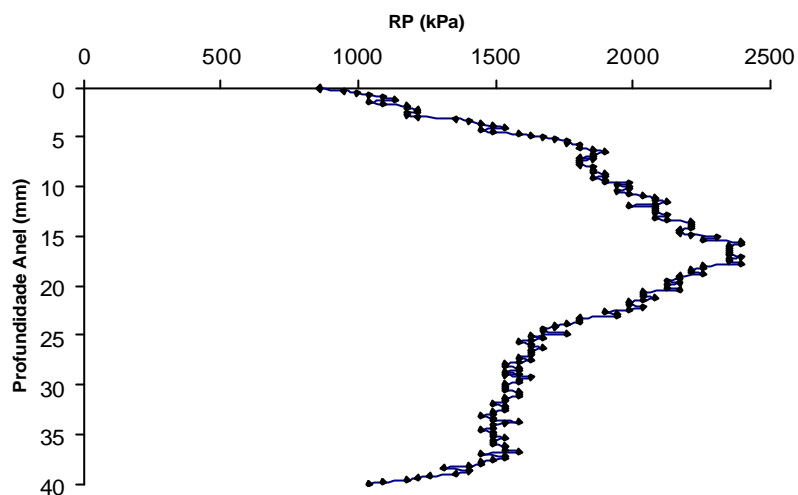
$IC_L = 2.144,09 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 97



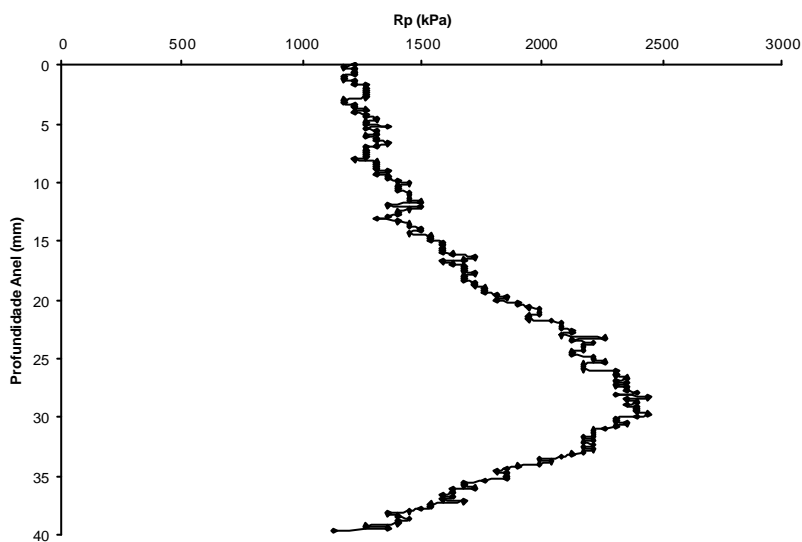
$IC_L = 1.923,79 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 156



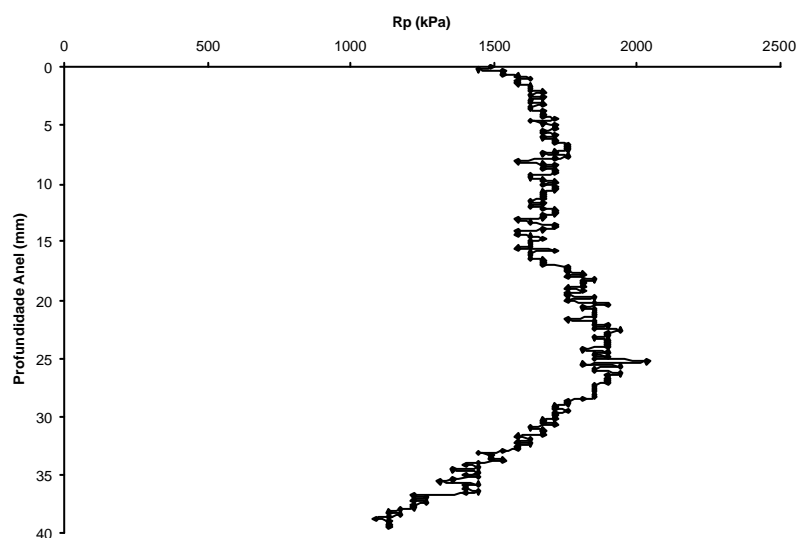
$IC_L = 1.826,86 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 85



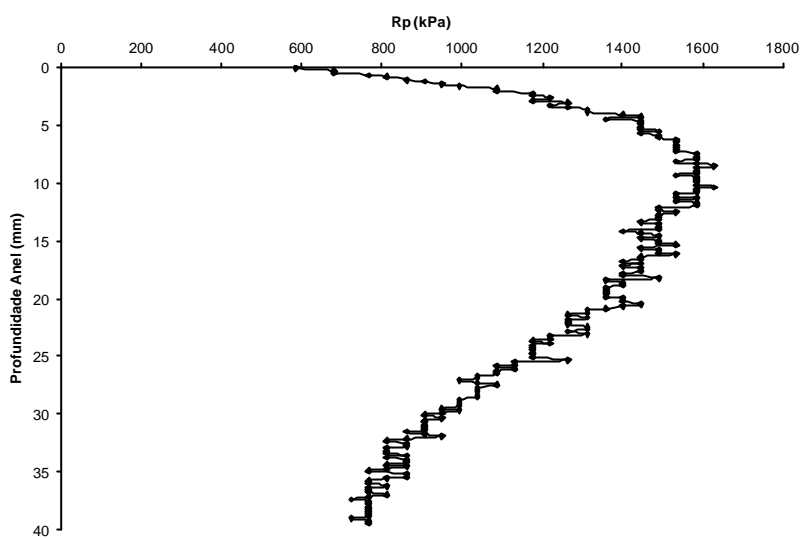
$IC_L = 1.737,15 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,16 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 17



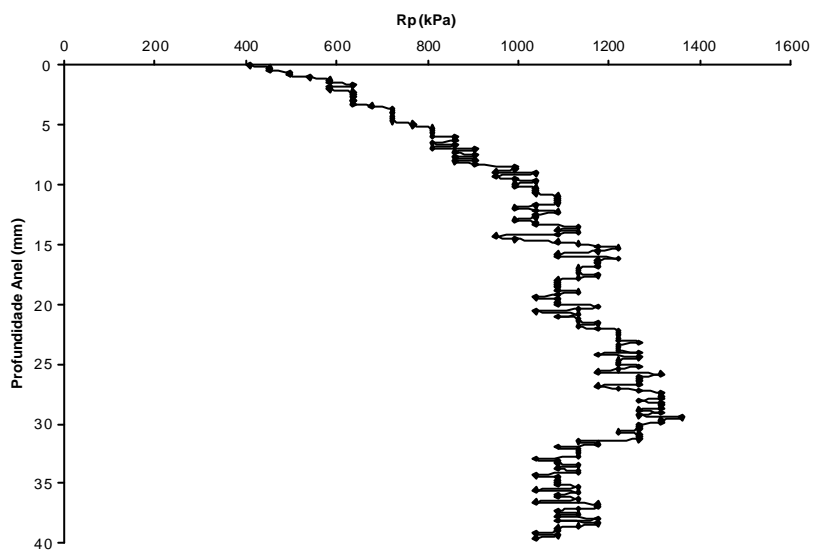
$IC_L = 1.714,30 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,16 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 91



$IC_L = 1.660,41 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,17 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 199

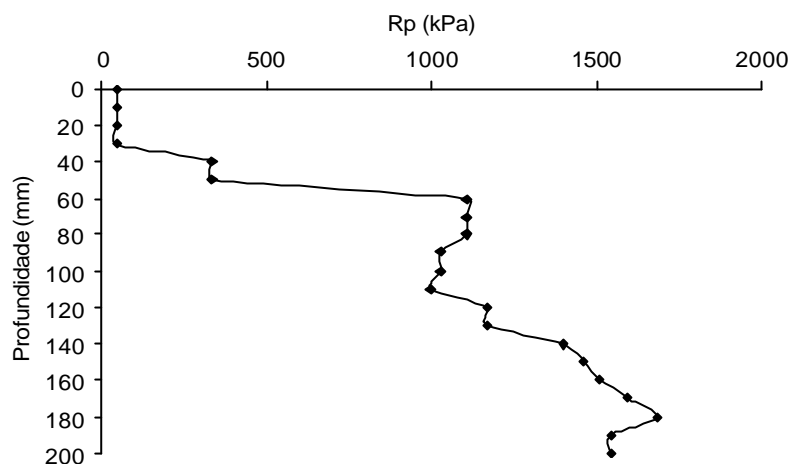


$IC_L = 1.200,71 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,16 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 163

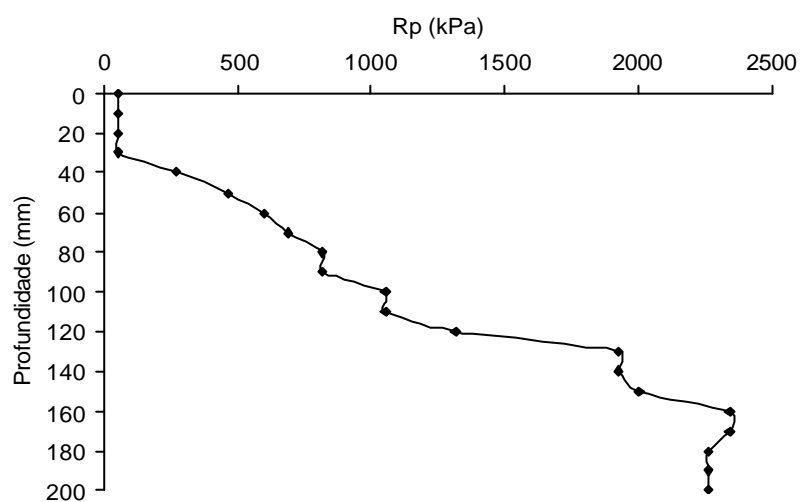


$IC_L = 1.049,85 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Anel 184

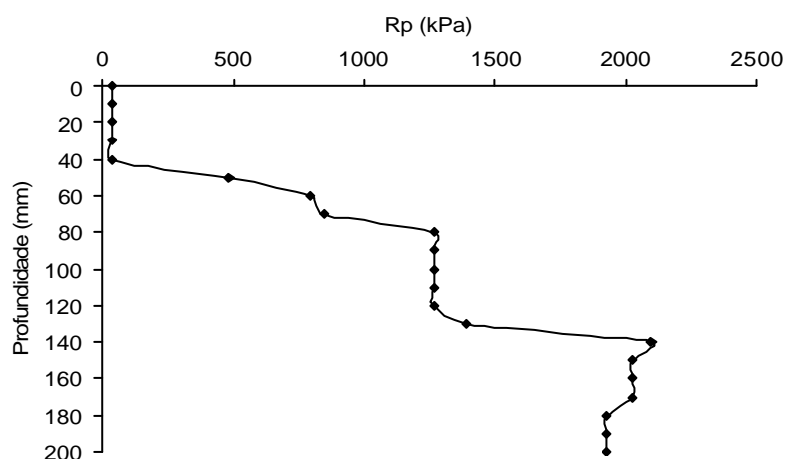
APÊNDICE 5 – Gráfico da variação da Rp em campo e IC_C na profundidade de 100 a 200 mm



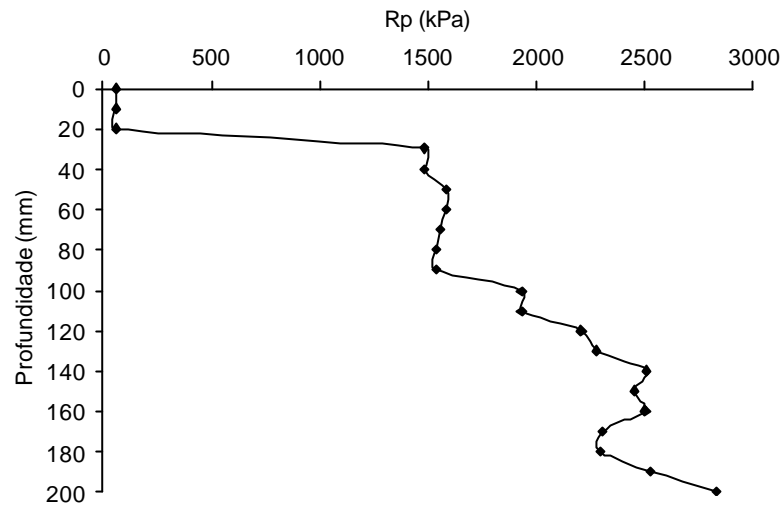
IC_C = 1.407,00 kPa - Ug = 0,15 kg.kg⁻¹ - Ponto 02



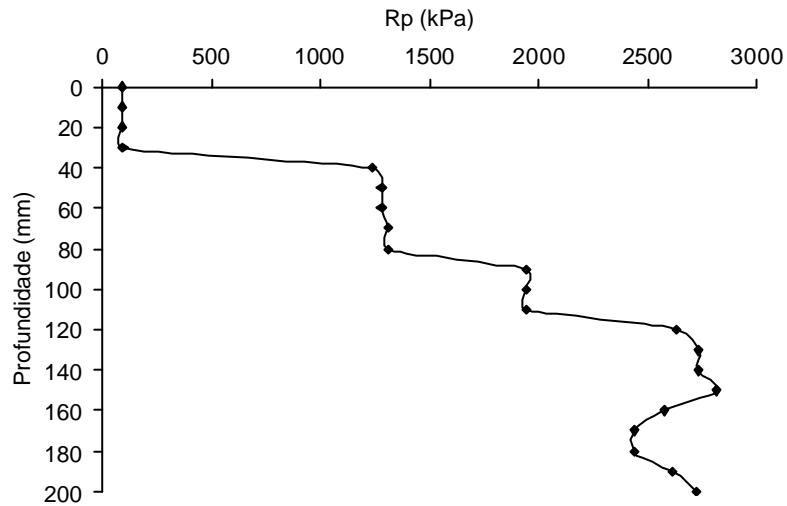
IC_C = 1.968,00 kPa - Ug = 0,15 kg.kg⁻¹ - Ponto 03



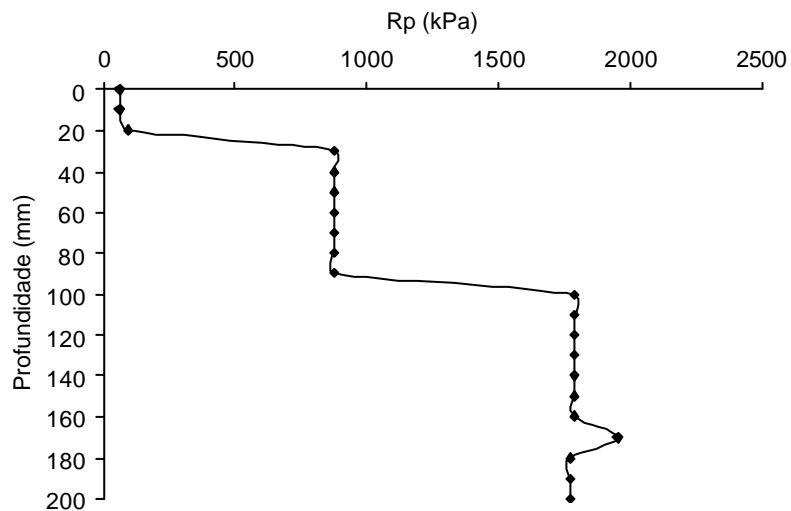
IC_C = 1.787,50 kPa - Ug = 0,14 kg.kg⁻¹ - Ponto 08



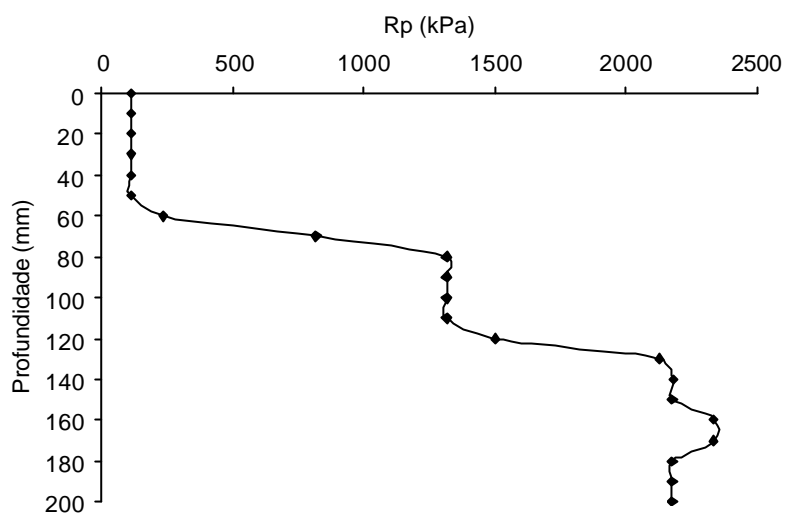
$IC_C = 2.383,50 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 10



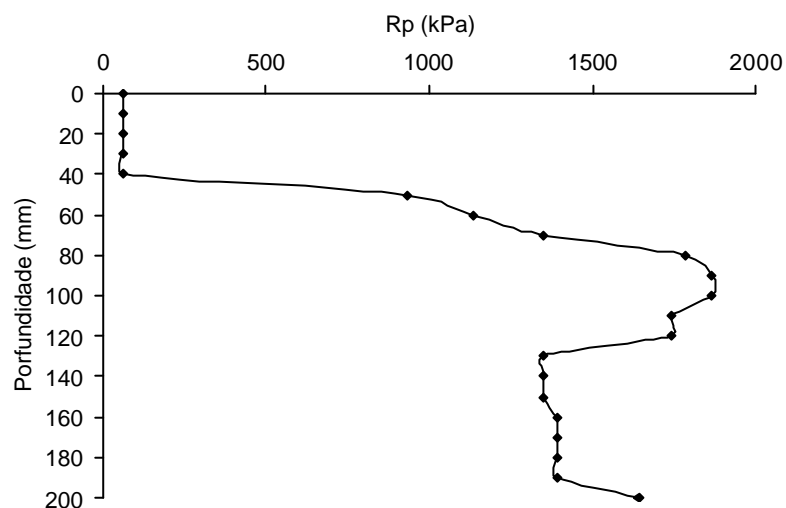
$IC_C = 2.563,00 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,13 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 12



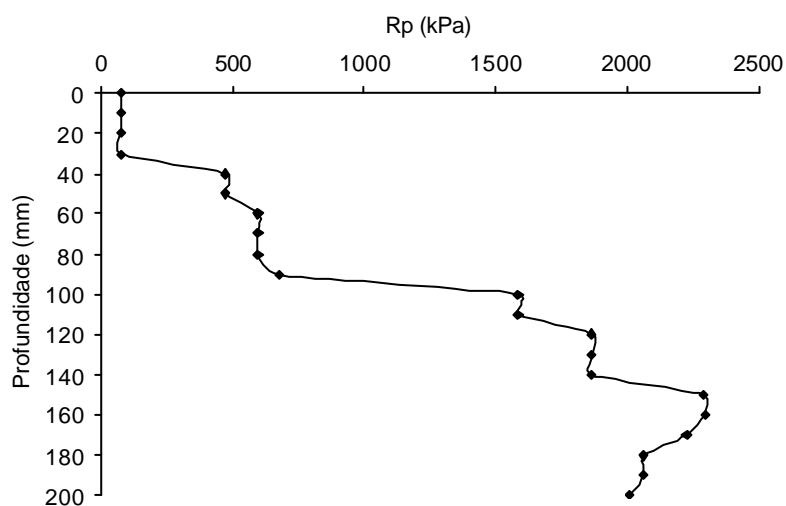
$IC_C = 1.798,00 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,15 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 13



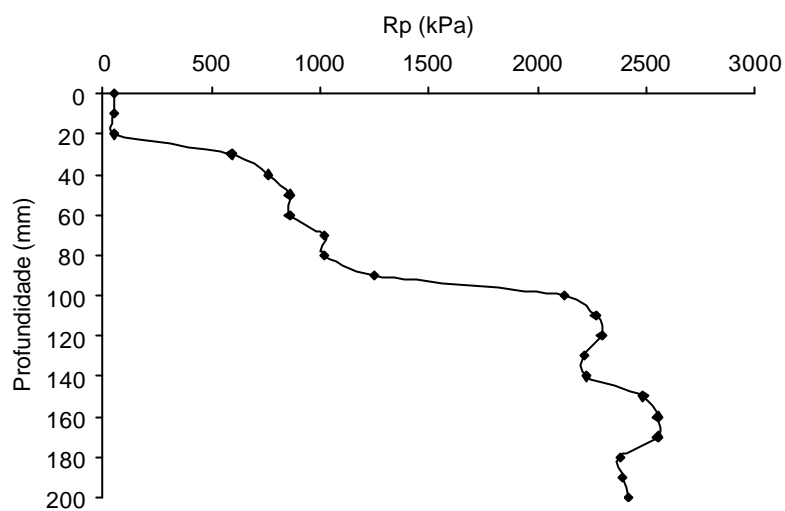
$IC_C = 2.048,50 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 14



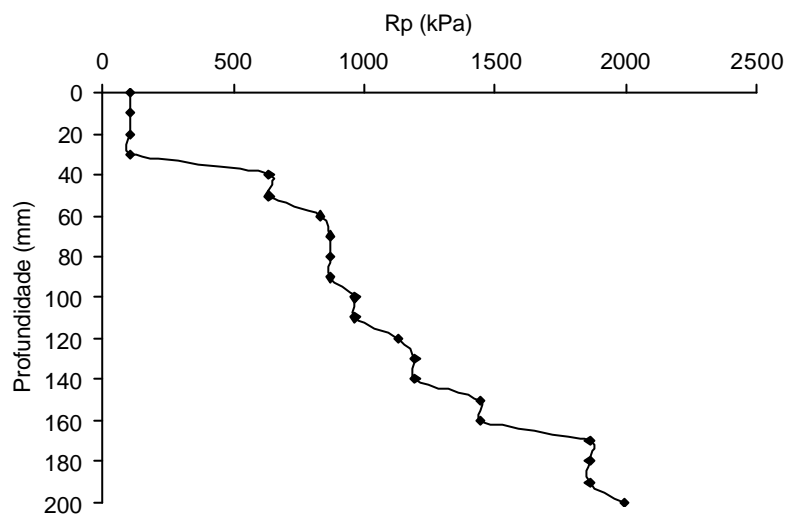
$IC_C = 1.474,50 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 15



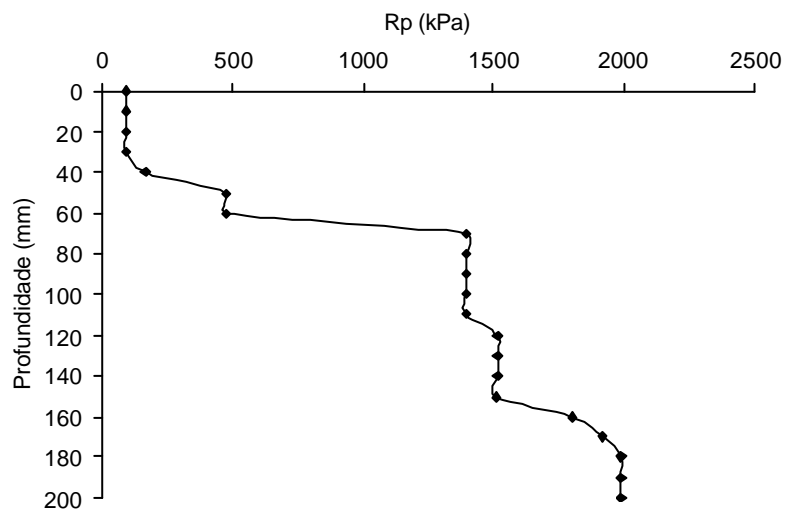
$IC_C = 2.013,00 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 17



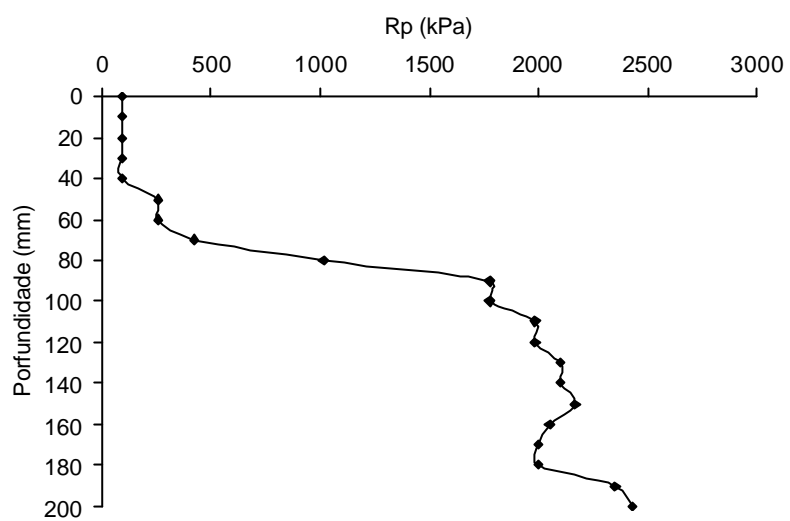
$IC_C = 2.379,50 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 19



$IC_C = 1.496,50 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 20



$IC_C = 1.712,50 \text{ kPa}$ - $U_g = 0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ - Ponto 22



IC_C = 2.116,50 kPa - U_g = 0,14 kg.kg⁻¹ - Ponto 24