

EURIEL MILLÁN ROMERO

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA, POROSIDADE E RESISTÊNCIA À
PENETRAÇÃO EM LATOSSOLOS ARTIFICIALMENTE
COMPACTADOS

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2007

EURIEL MILLÁN ROMERO

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA, POROSIDADE E RESISTÊNCIA À
PENETRAÇÃO EM LATOSSOLOS ARTIFICIALMENTE
COMPACTADOS

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

APROVADA: 23 de fevereiro de 2007.

Prof. Raphael Bragança Alves Fernandes
(Co-orientador)

Prof. Liovando Marciano da Costa
(Co-orientador)

Prof. Ivo Jucksch

Dr. Luiz Marcelo Aguiar Sans

Prof. Hugo Alberto Ruiz
(Orientador)

A DEUS.

À minha esposa *Irma Consuelo*.

Aos meus filhos *Carlos Andrés, Claudia Marcela e Vanessa*.

Aos meus pais *Elias Millán e Olinda Romero*.

AGRADECIMENTO

À Universidade de Sucre, Sincelejo-Sucre, Colômbia, pelo apoio financeiro oferecido durante todo o período do Curso.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Solos, pela oportunidade e pelos ensinamentos.

Ao professor Hugo Alberto Ruiz, pela efetiva orientação e pelo tratamento fraterno ao longo do curso.

Aos professores Raphael B. A. Fernandes, Carlos Ernesto G. R. Shaefer e Liovando Marciano da Costa, pelas críticas e valiosas sugestões.

Ao professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa e aos técnicos do Laboratório de Mecânica de Solos do Departamento de Engenharia Civil, pela cooperação na realização das análises de laboratório.

Aos laboratoristas do Departamento de Solos da UFV, Cláudio, Benedito, Fabio, Francisco e Janílson, pela valiosa colaboração na realização das análises de laboratório.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Solos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas de Pós-Graduação Augusto, Maurel, Márcio, Helton, Elton, Luiz, Carlos, Rogério, Nilson, e Fernando bem como à estagiária Andréia, pela amizade e pelas sugestões.

Aos amigos colombianos Omar e Elvira, pela amizade.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta pesquisa fosse realizada.

BIOGRAFIA

EURIEL MILLAN ROMERO, filho de Elias Millán e Olinda Romero, nasceu em Gigante, Departamento do Huila, Colômbia, no dia 23 de março de 1959.

Em 1984, graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidad Surcolombiana, Neiva-Huila, República de Colômbia.

Em 1995, graduou-se Especialista em Solos e Águas pela Universidad de Córdoba, Monteria-Córdoba, República de Colômbia.

É professor da Universidad de Sucre, Sincelejo-Sucre, República de Colômbia, desde julho de 1985.

Em março de 2005, iniciou o Curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Considerações gerais.....	3
2.2. Caracterização da compactação do solo.....	7
2.2.1. Densidade do solo.....	7
2.2.2. Resistência à penetração.....	8
2.2.3. Porosidade.....	9
2.2.4. Condutividade hidráulica em meio saturado.....	10
2.3. Intervalo Hídrico Ótimo.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1. Preparo das unidades experimentais.....	16
3.2. Determinação da condutividade hidráulica em meio saturado e da micro e macroporosidade em resposta ao IC.....	16
3.2.1. Cálculos.....	17
3.3. Determinação da resistência à penetração em resposta ao potencial da água do solo e ao IC.....	18

	Página
3.4. Determinação do Intervalo Hídrico Ótimo	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1. Condutividade hidráulica em meio saturado, macro e microporosidade	22
4.2. Resistência à penetração	27
4.3. Intervalo Hídrico Ótimo	36
5. CONCLUSÕES	44
6. REFERÊNCIAS.....	45
APÊNDICE.....	54

RESUMO

MILLÁN ROMERO, Euriel, M.Sc.; Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2007. **Condutividade hidráulica, porosidade e resistência à penetração em Latossolos artificialmente compactados.** Orientador: Hugo Alberto Ruiz. Co-Orientadores: Raphael B. A. Fernandes e Liovando Marciano da Costa.

A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física, como a prevenção da compactação, são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. Foram objetivos deste trabalho, realizado com amostras de um Latossolo Vermelho argiloso e um Latossolo Vermelho Amarelo muito argiloso, quantificar a condutividade hidráulica em meio saturado, a macro e a microporosidade em resposta ao índice de compactação (IC), definido pela relação entre a densidade do solo e a densidade máxima determinada pelo ensaio de Proctor. Também quantificar a resistência à penetração, em resposta ao IC e ao potencial da água do solo, e calcular o intervalo hídrico ótimo (IHO), visando sua utilização como indicador da qualidade física do solo. O IHO é uma área delimitada por relações de quatro variáveis dependentes com a densidade do solo: porosidade de aeração, conteúdo de água base volumétrica determinada a -100 hPa e a

-15.000 hPa e conteúdo de água base volumétrica que permite manter a resistência à penetração num valor prefixado *i*. As unidades experimentais foram cilindros de solo artificialmente compactados para atingir IC no intervalo de 0,70 a 1,00. A resistência à penetração foi determinada, adicionalmente, no intervalo delimitado pelos potenciais extremos de -60 e -15.000 hPa. Os resultados experimentais permitiram concluir que: a condutividade hidráulica e a macroporosidade são reduzidas com o incremento do IC e o incremento da microporosidade é inferior à diminuição da macroporosidade em resposta à compactação; a resistência à penetração aumenta com o incremento da compactação e a diminuição do potencial da água do solo. O LVA, com maior conteúdo de água nos potenciais de trabalho, apresentou menores valores de resistência à penetração e diferenças menos acentuadas, em resposta ao potencial, que o LV; a determinação do IHO é complemento adequado para diminuir perdas de produtividade em resposta à compactação, por estabelecer limites de restrição à aeração do sistema radicular e de resistência do solo ao crescimento das raízes; a convergência de resultados é indicativa da importância do uso de valores relativos, como o IC, na comparação de características de solos, em que os valores absolutos apresentam acentuada divergência; o IC na faixa de 0,70 a 0,85 não oferece restrições ao crescimento das plantas. Valores superiores indicam, inicialmente, restrições à aeração do solo e, quando na faixa de 0,95 a 1,00, impedimento ao crescimento de raízes pela resistência à penetração.

ABSTRACT

MILLÁN ROMERO, Euriel, M.Sc.; Universidade Federal de Viçosa, February of 2007. **Hydraulic conductivity, porosity and resistance to the penetration in Latosols artificially compacted.** Adviser: Hugo Alberto Ruiz. Co-Advisers: Raphael B.A. Fernandes and Liovando Marciano da Costa.

The understanding and quantification of the impact of use and management of soil in its physical quality, in relation to prevention of compaction, are fundamentals in the development of sustainable agricultural systems. The objective of this work was performed with sample of a clayey Red Latosol and clayey Red Yellow Latosol, estimating hydraulic conductivity in saturated medium, macro and micro porosity in response to the index of compaction (IC) defined by the relation between the bulk density and the maximum density determined by test of Proctor. Also quantify the resistance of penetration, in response to IC and water potential of the soil and calculate the optimum hydric interval (OHI) seeking its utilization as indicator of physical quality of the soil. The OHI is an area limited by four dependent variables related to bulk density such as: aeration porosity, water content determined on volumetric bases -100 hPa and -15.000 hPa and the water

content on volumetric bases permitting to maintain the resistance of the penetration in a pre-fixed value. The experimental unit were cylinders of soil artificially compacted to attained IC with in interval of 0.70 to 1.00. The resistance of the penetration was determined, additionally, in the interval limited by extreme potentials of -60 and -15.000 hPa. The results of the experiment permitted to conclude that: a) the hydraulic conductivity and macro porosity were reduced with the increment of IC and the increment of micro porosity is lower than the reduction of macro porosity in response to the compaction; b) the resistance of penetration increases with the increment of the compaction. It also increases with water potential of the soil decreases. The LVA with high water content in the working potential, reached to lower values of resistance of penetration and the difference is less accentuated, in response to the potential, as that of the LV; c) the determination of OHI is important to decrease the loss of productivity due to compaction, to establish limit of restriction in aeration of root system and the resistance of soil in the growth of roots; d) the convergence of results is indicator of the importance of using relative values, such as IC, in the comparison of soil characteristics, since the absolute value showed high divergence; e) IC in the range of 0.70 to 0.85 did not give restriction in the growth of the plants. High values indicated, initially restriction in the aeration of soil and when the range of 0.95 to 1.00, ending root growth due to resistance of penetration.

1. INTRODUÇÃO

A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. A introdução de sistemas agrícolas em substituição às florestas causa desequilíbrio no ecossistema, modificando as propriedades do solo, cuja intensidade varia com as condições de clima, uso e manejo adotados e a natureza do solo. Com o uso intensivo dos solos geralmente ocorre deterioração de suas propriedades físicas.

A qualidade física do solo para o crescimento das plantas é determinada não só pela disponibilidade de água, ar e temperatura, mas também pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes. Num solo degradado, a redução da quantidade de água e da taxa de difusão de oxigênio e o incremento de resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas mesmo na faixa de potenciais que determinam o intervalo de água disponível para as plantas. A compactação do solo é associada a decréscimos na produtividade, porém os valores de densidade do solo a partir dos quais a produtividade diminui apresentam elevada variabilidade em resposta, fundamentalmente, à textura do solo.

Os estudos do processo de compactação do solo têm envolvido, mais recentemente, alguns ensaios freqüentemente usados na área de mecânica dos

solos. Exemplo disso é a aplicação do ensaio de Proctor normal. Entretanto, a literatura brasileira sobre o uso deste ensaio para fins agrícolas é escassa. A compactação tem sido também caracterizada pela determinação da resistência à penetração, utilizando-se penetrômetro. Esse instrumento reporta o estado de estrutura de um solo de acordo com o conteúdo de água, a textura e a mineralogia.

A compactação do solo está geralmente relacionada às práticas de uso e manejo, evidenciando-se pela modificação da estrutura e pela diminuição do espaço poroso. Para minimizar os efeitos da compactação, são recomendadas técnicas de manejo do solo, como a subsolagem ou escarificação, que permitem a ruptura das camadas endurecidas. Todavia, com frequência, não existem índices precisos para caracterizar a compactação e indicar o momento da realização dessas práticas, o que se deve à elevada variabilidade dos limites críticos para as culturas entre as diferentes classes de solos.

Postula-se que a compactação diminui a condutividade hidráulica em meio saturado, pela diminuição da macroporosidade, e incrementa a resistência à penetração. Com respeito a esta última característica, considera-se a resistência à penetração inversamente proporcional ao potencial da água do solo.

Foram objetivos deste trabalho, realizado com amostras de um Latossolo Vermelho argiloso e um Latossolo Vermelho Amarelo muito argiloso:

- Quantificar a condutividade hidráulica em meio saturado, a macro e a microporosidade em resposta ao incremento artificial da densidade do solo, até igualar à densidade máxima determinada pelo ensaio de Proctor.
- Quantificar a resistência à penetração, em resposta ao incremento artificial da densidade e ao potencial da água do solo.
- Calcular o Intervalo Hídrico Ótimo, visando sua utilização como indicador da qualidade física dos solos, relacionando dados relativos à aeração e ao conteúdo de água com a densidade do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações gerais

A compactação é um processo de degradação do solo usualmente descrito como uma deterioração de sua estrutura, manifestada pela alteração de importantes propriedades físicas (Lal, 1979). Qualquer alteração significativa que ocorra na estrutura do solo, seja pela compactação, seja por outro processo, provocará mudanças nas relações solo-água-ar, na resistência mecânica e na própria temperatura do solo e, em consequência, na resposta deste em termos de comportamento físico ao crescimento das plantas. Portanto, é de fundamental importância buscar práticas de manejo que mantenham ou melhorem as condições estruturais dos solos (Pedrotti & Dias Jr., 1996).

Em solos agrícolas, esse processo acontece, geralmente, pelo tráfego de máquinas, cuja pressão, aplicada ao solo, provoca a ruptura dos agregados e a aproximação das partículas (Baver et al., 1972; Vieira, 1978). Também pode ocorrer com o tempo de uso, associado ao manejo intensivo do solo (Lal, 1979; Boels et al., 1982) e com o decréscimo do teor de matéria orgânica (Baver et al., 1972).

Para evitar a compactação, o preparo do solo deve ser efetuado em condições de friabilidade (Resende, 1997). Nessa condição de umidade, o solo apresenta baixa resistência ao preparo e alta a moderada capacidade de suporte de carga e resistência à compressão (Larson et al., 1994). A compactação, devida à aplicação de cargas ou pressões, provoca aumento na densidade do solo, pela redução da porosidade e pela modificação de sua estrutura (Watson Jr. et al., 1951; Lindemann et al., 1982).

O solo pode ser alterado por ação de uma carga devido à compressão do espaço poroso e ao rearranjo das partículas sólidas (Harris, 1971). Esse rearranjo das partículas primárias e dos agregados constitui uma das causas mais importantes da compactação dos solos (Camargo, 1983). A intensidade desse processo está associada à umidade do solo, especialmente quando da realização das práticas de preparo para o plantio (Weaver & Jamieson, 1951). No que diz respeito a essa observação, Saini & Chow (1984) verificaram que a compactação, que resulta num aumento da densidade do solo, está relacionada com o conteúdo de água e a força aplicada.

Estudando a variação da densidade do solo em relação ao conteúdo de água, quando se aplica uma força constante, Proctor (1933) verificou que a densidade aumentava com a umidade até atingir um máximo e logo diminuía com maiores acréscimos de água. Na porção ascendente da curva, com o incremento na umidade, a película de água adsorvida fica mais espessa, provocando a lubrificação das partículas, que deslizam e se orientam, formando uma massa mais densa. Após atingir o valor máximo, a densidade diminui. Nesse segmento da curva, os altos teores de água promovem o afastamento das partículas, comportando-se o solo como um fluido (Baver et al., 1972; Hillel, 1982). O valor máximo atingido foi denominado “Densidade Aparente Máxima” e a umidade correspondente, “Umidade Ótima de Compactação”. Esses termos que são utilizados em mecânica do solo, visando à construção de estradas (Proctor, 1933). A última expressão não é adequada na ciência do solo, que utiliza, com maior propriedade, o termo “Umidade Crítica de Compactação” (Saini e Chow, 1984).

Numerosos pesquisadores verificaram também a influência da umidade na compactação, em diversas classes de solo, a uma carga constante (Meredith & Patrick, 1961; Bodman & Constantin, 1965; Saini & Chow, 1984; Silva, 1984; Garcia et al., 1986; Peres & Diaz, 1989). Essas observações destacam a importância do conteúdo de água no solo para a intensificação do processo de compactação. Salientando esse fato, Soane (1970) afirma que, para cada tipo de solo e uma determinada pressão, o grau de compactação depende principalmente do teor de água. Pode indicar também que o conteúdo de argila e o teor de matéria orgânica são constituintes que influenciam a suscetibilidade à compactação de um solo (Saini & Chow, 1984).

Bodman & Constantin (1965) demonstraram a influência do teor de argila na densidade máxima, sendo observados maiores valores em amostras menos argilosas. Esses autores verificaram também níveis de umidade crítica de compactação mais baixos à medida que se incrementava a proporção de partículas maiores. A influência negativa das frações mais grosseiras nesse processo está relacionada à sua menor superfície específica, que, de maneira geral, influi na menor porosidade total e no menor conteúdo de água. A baixa adsorção de água dificulta a formação de películas espessas em volta das partículas do solo. Esse processo é atenuado pela presença de matéria orgânica, responsável pelo incremento da adsorção de água.

Diferenças na susceptibilidade à compactação responderam ao efeito moderador induzido pela matéria orgânica (Peres & Diaz, 1989). Esses autores também demonstraram que aqueles solos que precisavam de menor quantidade de água para atingir o estado plástico eram mais susceptíveis à compactação que aqueles que requeriam mais água. À medida que aumenta o conteúdo de argila do solo, aumenta também o índice de plasticidade. Dessa forma, quanto maior a superfície específica, maior o número de moléculas de água adsorvida e, por conseguinte, mais elevados os limites de Atterberg (Renedo, 1996).

A influência da matéria orgânica na densidade máxima está demonstrada no trabalho de Soane (1971). Este autor constatou acréscimo da densidade máxima no solo de 1,40 para 1,61 kg dm⁻³ e decréscimo na umidade

crítica de compactação de 26 para 22 %, com a diminuição do teor de matéria orgânica. Peres & Dias (1989) também observaram diferenças na susceptibilidade à compactação, devido ao efeito moderador induzido pela matéria orgânica.

Além desses fatores, o mineral de argila predominante também exerce influência na susceptibilidade do solo à compactação. Estudando o papel da mineralogia nas propriedades físicas dos Latossolos, Ferreira (1988) indicou a caulinita e a gibbsita como os minerais mais atuantes, especialmente sobre a estabilidade dos agregados e a condutividade hidráulica. Os Latossolos caulínicos apresentaram menor estabilidade de agregados em água, quando comparados a Latossolos gibbsíticos. Em geral, os Latossolos são caracterizados como tendo alto grau de estabilidade estrutural, com estrutura granular forte, normalmente devido à cimentação das partículas do solo pela ação dos óxidos de ferro e de alumínio.

As argilas silicatadas, como a caulinita, são importantes no processo de compactação ou de adensamento. Sua morfologia laminar permite o arranjo orientado das partículas e possibilita uma aproximação mais uniforme das unidades estruturais (Acha, 1976).

Dentre os ensaios utilizados para estudar a compactação do solo em laboratório destacam-se o de Proctor normal e o de compressão uniaxial. Esses ensaios são muito utilizados na engenharia civil, embora vários trabalhos tenham sido conduzidos para sua adaptação ao manejo do solo (Ekwue & Stone, 1997; Figueiredo & Dias Jr., 1997; Silva, 1999; Barzeagar & Assodar, 2000; Miranda, 2001; Oliveira et al., 2003). Estudando diversas variáveis, foi verificada a influência do conteúdo de água (Dias Jr. & Pierce, 1996), da textura (Pacheco & Dias Jr., 1990) e da matéria orgânica (Moraes, 1988; Torres et al., 1993), entre outras, na susceptibilidade à compactação.

A densidade do solo tem sido utilizada como indicador do nível de compactação (Borges et al., 1999; Díaz-Zorita, 2000; Krzic et al., 2000; Queiroz-Voltan et al., 2000). Entretanto, outros estudos utilizaram o grau de compactação como indicador do nível de compactação devido ao fato de este

permitir normalização dos valores de densidade do solo (Corrêa et al., 2001; Dias Jr. & Estanislau, 1999; Miranda & Dias Jr. 2000). O grau de compactação é calculado pela relação entre a densidade do solo no tratamento e a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor.

2.2. Caracterização da compactação do solo

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados utilizando diferentes características relacionadas com a estabilidade estrutural do solo, como a densidade do solo, a resistência à penetração, a porosidade e a condutividade hidráulica.

2.2.1. Densidade do solo

Freqüentemente, o estado de compactação é caracterizado pela densidade do solo. Os índices críticos que limitam a penetração das raízes são associados, normalmente, à classe textural do solo. Assim, Veihmeyer & Hendrickson (1948) observaram, na cultura do girassol, valores limites de 1,7 a 1,8 kg dm⁻³ para um solo arenoso; de 1,6 kg dm⁻³, para um solo siltoso; e de 1,5 kg dm⁻³, para um solo argiloso.

Em estudo com solos mais intemperizados, Grohmann & Queiroz Neto (1966) encontraram impedimento físico ao crescimento das raízes de arroz a 1,42 kg dm⁻³, em um Latossolo Vermelho, e a 1,38 kg dm⁻³, num Argissolo Vermelho-Amarelo, ambos de textura franca. Borges et al. (1988) observaram ausência de raízes de soja quando atingida densidade do solo de 1,35 kg dm⁻³, em Latossolo Vermelho de textura muito argilosa. Para a mesma cultura, em Latossolos de composição granulométrica semelhante, Moraes (1988) encontrou valores limites de 1,23 a 1,30 kg dm⁻³.

As densidades do solo indicadas anteriormente destacam uma considerável variabilidade dos valores críticos não só entre classes texturais e culturas, mas também dentro de uma mesma classe de solo.

2.2.2. Resistência à penetração

A resistência do solo à penetração é uma propriedade física diretamente relacionada com o crescimento das plantas e serve como característica indicativa de compactação/adensamento (Letey, 1985). Valores críticos de resistência à penetração de 1,5 a 4,0 MPa foram relatados (Arshad et al., 1996; Rosolem et al., 1999), variando de acordo com o tipo de solo e a espécie cultivada (Genro Jr. et al., 2004).

Dentre os vários indicadores físicos do solo, a resistência mecânica à penetração pode ser empregada para avaliar a resposta a diferentes sistemas de manejo (Benghough & Mullins, 1990). A compactação pode ser caracterizada quanto à resistência à penetração utilizando-se o penetrômetro. As medidas desse instrumento são indicativas do estado da estrutura do solo em função do conteúdo de água, da textura e da mineralogia da fração argila (Harris, 1971; Baver et al., 1972).

As medidas de resistência com penetrômetro são usadas, geralmente, procurando relacioná-las com valores de impedância mecânica ou restrição ao crescimento das raízes. Contudo, em muitos aspectos, a ação da ponta do penetrômetro não é comparável à das raízes, pois o deslocamento do cone do penetrômetro é basicamente vertical. Em contrapartida, a expansão do sistema radicular é bastante complexa, em sentido radial (Peres & Diaz, 1989).

Outro argumento sobre as diferenças entre as resistências encontradas pelo penetrômetro e pelas raízes diz respeito à natureza flexível destas últimas. As raízes são capazes de aproveitar planos de fraqueza no solo, em contraste aos cones de metal, que, sendo rígidos, seguem um caminho reto (Aubertin & Kardos, 1965; Stolsy & Barley, 1968). Não obstante essas limitações existem informações sobre valores críticos de impedância mecânica, acima dos quais cessaria o crescimento das raízes. Assim, Peres & Diaz (1989) propuseram um índice crítico para a penetração radicular de 1,2 MPa. Outros pesquisadores observaram, para diferentes culturas, índices de 2,25 MPa (Taylor & Burnett,

1964; Taylor et al., 1966) ou ainda superiores, de 3,0 MPa, para solos de textura arenosa (Gerard et al., 1982).

O uso desses e de outros índices para caracterizar a compactação foi discutido por Chancellor (1976), Soane et al. (1981) e Primavesi (1986). Esses autores observaram que muitas dessas características apresentam, freqüentemente, grande variabilidade entre solos, dificultando sua utilização. Para permitir a comparação entre solos e estabelecer níveis críticos de compactação, Soane et al. (1981) propuseram a adoção de métodos de referência e a utilização de índices.

Pidgeon & Soane (1977) e Barber et al. (1989) usaram a relação entre a densidade de um solo (D_s) em kg dm^{-3} e a densidade máxima, obtida pelo ensaio de Proctor em laboratório (DP), em kg dm^{-3} . Essa relação foi denominada índice de compactação relativa (ICR):

$$\text{ICR} = \frac{D_s}{DP} \quad (1)$$

Considerando que a palavra *índice* pode ser definida como a *relação entre os valores de qualquer medida*, entende-se que essa palavra inclui a conotação de *relativa*. Assim, o *índice de compactação relativa* (ICR) será denominado, no texto, *índice de compactação* (IC).

A utilização da DP no cálculo do IC relaciona-se ao fato que, quando o solo atinge a densidade máxima, a macroporosidade é reduzida a valores próximos de zero (O'Connell, 1975).

2.2.3. Porosidade

A compactação provoca alterações na distribuição do tamanho dos poros do solo. Silva (1984) observou redução dos poros maiores que 0,05 mm e incremento dos poros inferiores a esse limite quando compactou, artificialmente, amostras retiradas de dois Latossolos sob diferentes coberturas vegetais. Alvarenga (1993) verificou redução de 0,31 para 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na macroporosidade quando a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo incrementou a densidade de 1,04 para 1,40 kg dm^{-3} .

Essa redução do volume de macroporos provoca alterações na relação água-ar. Como a difusão de oxigênio depende do espaço poroso livre de água, quando o solo estiver próximo à saturação, condição relativamente fácil de ser atingida na presença de camadas compactadas, a aeração é prejudicada. Diversos autores têm proposto volume mínimo de ar de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para permitir adequada aeração das raízes (Vomocil & Flocker, 1961; Baver et al., 1972; Taylor & Ascroft, 1972; Xu et al., 1992). Em trabalho de O'Connell (1975), esse limite correspondeu a um valor de 0,90 no IC.

2.2.4. Condutividade hidráulica em meio saturado

Na relação solo-água-planta é importante considerar o solo como um sistema poroso onde a água se movimenta. Esse processo é dinâmico e apresenta contínuas mudanças no tempo e no espaço. Um dos fatores que alteram profundamente o fluxo da água é a compactação do solo, por modificar a distribuição e a continuidade do espaço poroso. Stone et al. (2001) observaram que o aumento da densidade do solo reduziu o tamanho dos poros para o fluxo de água e a condutividade hidráulica em meio saturado (K_0). Num Latossolo Vermelho, quando a densidade do solo foi elevada de 1,07 para $1,32 \text{ kg dm}^{-3}$, observou-se diminuição de K_0 de 1,11 para $0,59 \text{ cm h}^{-1}$, respectivamente (Medeiros et al., 2001).

Eagleman & Jamieson (1962) realizaram medidas da velocidade e fluxo da água e do gradiente hidráulico, mostrando que a água transfere-se dos poros maiores para os menores com facilidade, sendo o fluxo inverso mais difícil. Ocorrendo quebras na estrutura do solo com a compactação de diferentes camadas, aumenta-se o impedimento ao movimento da água.

A Lei de Poiseuille mostra que o volume da água que flui por um tubo na unidade de tempo, é proporcional à quarta potência do raio (Hillel, 1982). Assim, se o diâmetro de um tubo é reduzido em $2/3$, a vazão diminuirá para $1/81$ da inicial. Como a compactação reduz a quantidade dos poros maiores, observar-se-á, paralelamente, acentuada redução no movimento de água em

solo saturado (Camargo, 1983). Esse fato foi previamente comprovado por Ghildyal & Satyanarayama (1965), os quais concluíram que a condutividade hidráulica estava diretamente relacionada à macroporosidade. Trabalhos realizados com diversos Latossolos compactados artificialmente mostraram redução de K_0 com o aumento da compactação (Coleti & Dematte, 1983; Silva, 1984).

Em condições de campo, com frequência é determinada a infiltração para caracterizar o estado de compactação dos solos. Moura Filho & Boul (1972) compararam os efeitos de 15 anos de utilização agrícola em um Latossolo Vermelho e observaram que as taxas de infiltração diminuíram de 82 para 12 cm h^{-1} com a prática do cultivo intensivo. A diminuição da infiltração esteve associada a uma redução dos poros maiores que 0,05 mm de diâmetro, tanto no horizonte A como no B. Esses autores indicaram que a compactação produzida por máquinas pesadas foi a causa da diminuição da macroporosidade.

2.3. Intervalo Hídrico Ótimo

A avaliação da qualidade física do solo tem sido baseada na quantificação de propriedades que, em geral, apresentam pouca relação, em termos práticos, com o manejo do solo e o crescimento das plantas. Letey (1985) propôs um modelo para descrever a faixa de conteúdo de água base volumétrica, que não impõe restrições ao crescimento das plantas, levando em consideração a aeração, a água disponível e o conteúdo de água que corresponde a um valor prefixado de resistência à penetração, quando confrontadas com a densidade do solo. Essa faixa, denominada *Non-Limiting Water Range* (NLWR), é uma característica que integra, numa única medida, os efeitos das modificações na estrutura do solo sobre seus atributos físicos diretamente ligados ao crescimento das plantas, com exceção da temperatura. Na definição desse conceito, Letey (1985) considerou que a resposta das

plantas às modificações físicas do solo é manter essa faixa ótima dentro dos limites do NLWR e impedida fora dos seus limites.

Silva et al. (1994) aprimoraram e quantificaram esse conceito, denominando-o *Least Limiting Water Range* (LLWR). Foi definido como a faixa de conteúdo de água associada com o potencial matricial, a aeração e a resistência mecânica, em que ocorrem limitações mínimas para o crescimento das plantas.

O limite superior do LLWR é a umidade do solo na capacidade de campo ou a umidade do solo em que a porosidade de aeração atinge $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Considera-se que há impedimento ao crescimento das raízes com valores de porosidade de aeração inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. O limite inferior é a umidade no ponto de murcha permanente ou a umidade do solo na qual a resistência à penetração atinge um valor de resistência à penetração prefixado, geralmente de 2,0 MPa. Na definição do LLWR, Silva et al. (1994) postulam que o crescimento das culturas é menos restrito dentro dos limites do LLWR e que as limitações aumentam na extrapolação desses limites.

O LLWR foi quantificado por Silva et al. (1994) e Topp et al. (1994), relacionando as variáveis apontadas com a densidade do solo. Orellana et al. (1997) também utilizaram o conceito introduzido por Letey (1985) em avaliações da qualidade física do solo, denominando-o de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). O termo foi também adotado por Tormena (1998) como tradução do LLWR.

Jayawardane & Chan (1994) fizeram uso do conceito do IHO para a avaliação das práticas de manejo em solos sódicos da Austrália. Os autores salientam que, quanto mais estreito o IHO, maior é a dificuldade em manter o conteúdo de água do solo dentro dos limites da faixa de umidade crítica para o crescimento das plantas. Mais recentemente, Stirzaker (1997) demonstrou que o aumento da compactação do solo e, como consequência, da sua densidade levou à redução do IHO, diminuindo o crescimento vegetativo de plantas de tomate.

A vantagem primordial da utilização do IHO para avaliar a qualidade física do solo é a integração, numa única representação, dos fatores físicos diretamente relacionados ao crescimento das plantas. Dessa forma, práticas de manejo que modificam a estrutura do solo ampliando o IHO e, ou, mantendo a umidade dentro dos seus limites, são potencialmente menos restritivas para o crescimento e a produtividade das culturas.

O IHO se enquadra como um índice que fornece de forma integrada as manifestações funcionais da estrutura do solo para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Boone, 1988). Isso é de importância para diferenciar respostas à condição estrutural do solo de outras que também influenciam a produtividade das culturas (Cresswell & Kirkegaard, 1995).

Nos trabalhos de Silva et al. (1994) e Topp et al. (1994), a resistência à penetração foi o fator que mais frequentemente impôs limitações, estreitando o IHO, quando comparada à aeração no solo. Outros autores confirmaram a suposição de que a magnitude do IHO é um indicador da frequência com que a estrutura do solo determina condições físicas impróprias para o crescimento das plantas (Kay, 1989; Jayawardane & Chan, 1994; Silva & Kay, 1996, 1997a). Em solos da mesma textura, o IHO foi positivamente correlacionado com o conteúdo de matéria orgânica do solo (Kay et al., 1997; Silva & Kay, 1997b).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de dois solos de Minas Gerais: um Latossolo Vermelho (LV), do município de Capinópolis, e um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), do município de Viçosa. As amostras foram retiradas nas profundidades de 40 a 60 cm e, na seqüência, secadas ao ar, passadas em peneira de 2 mm e caracterizadas (Quadro 1). A caracterização mineralógica da fração argila evidenciou presença de caulinita, gibbsita, goethita e hematita (Quadro 2).

Para a determinação da densidade máxima de Proctor (DP) utilizou-se o método indicado no Ensaio NBR 7182 (ABNT, 1986). Assim, amostras de 3 kg de solo receberam água até atingir potenciais próximos a -100 hPa. Uma porção do solo umedecido foi colocada nos dois tubos superpostos do equipamento, de forma que ocupasse um terço do seu volume. Essa amostra recebeu 25 golpes de um soquete de 2,5 kg, de uma altura de 30 cm. Esse impacto representa uma energia de compactação de 5,7 kgf cm cm⁻³. A operação foi repetida em duas oportunidades, até completar a colocação da amostra nos tubos. Após a retirada do tubo superior e do excesso de solo umedecido com espátula, o conjunto (tubo inferior mais solo umedecido) foi pesado, calculando-se a densidade da amostra úmida. Esse valor foi corrigido para densidade da amostra seca, subtraindo a massa de água da massa do solo

úmido. A densidade foi assim determinada para seis valores de umidade. Ajustando uma equação de regressão quadrática, determinou-se o valor de umidade que permite atingir a máxima densidade. Esse teor de água corresponde à umidade crítica de compactação (Saini & Chow, 1984).

Quadro 1 – Caracterização dos solos

Característica	LV	LVA
Areia grossa (kg kg ⁻¹) ^{1/}	0,13	0,14
Areia fina (kg kg ⁻¹) ^{1/}	0,12	0,06
Silte (kg kg ⁻¹) ^{2/}	0,16	0,06
Argila (kg kg ⁻¹) ^{2/}	0,59	0,74
Densidade do solo (kg dm ⁻³) ^{3/}	1,16	0,97
Densidade de partículas (kg dm ⁻³) ^{4/}	2,83	2,66
Porosidade (m ³ m ⁻³) ^{5/}	0,590	0,635
Macroporosidade (m ³ m ⁻³) ^{5/}	0,188	0,209
Microporosidade (m ³ m ⁻³) ^{6/}	0,402	0,426
Densidade máxima de Proctor (kg dm ⁻³) ^{7/}	1,64	1,37
Porosidade na densidade máxima de Proctor (m ³ m ⁻³) ^{5/}	0,421	0,485
Umidade crítica de compactação base gravimétrica (kg kg ⁻¹) ^{7/}	0,244	0,324
Umidade crítica de compactação base volumétrica (m ³ m ⁻³) ⁵	0,400	0,444
Grau de saturação na umidade crítica de compactação (m ³ m ⁻³) ⁵	0,950	0,915
Retenção de água (kg kg ⁻¹) ^{8/}		
-60 hPa	0,346	0,417
-100 hPa	0,276	0,359
-300 hPa	0,206	0,278
-1.000 hPa	0,186	0,256
-5.000 hPa	0,176	0,249
-15.000 hPa	0,170	0,235
Matéria orgânica (dag/kg) ^{9/}	1,39	2,99

^{1/} Por peneiramento (Ruiz, 2005). ^{2/} Método da pipeta (Ruiz, 2005). ^{3/} Método da proveta (Ruiz, 2004). ^{4/} Método do balão volumétrico (Ruiz, 2004). ^{5/} Ruiz (2004). ^{6/} Mesa de tensão (Bouma, 1973). ^{7/} Ensaio NBR 7182 (ABNT, 1986). ^{8/} Richards (1949). ^{9/} Método Walkley-Black modificado (Defelipo & Ribeiro, 1997).

Quadro 2 – Caracterização mineralógica da fração argila (Fernandes, 2000)

Solo	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita
	%			
LV	55	14	7	9
LVA	70	11	9	3

3.1. Preparo das unidades experimentais

As unidades experimentais utilizadas no ensaio foram tubos cilíndricos de aço inoxidável, de 4,8 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, preenchidos com amostra de solo até 3,0 cm. Em todos os ensaios foram testados quatro índices de compactação (IC): 0,7, 0,8, 0,9 e 1,0. Quantidades de amostras, peneiradas em malha de 2 mm, previamente calculadas para formar cilindros de 4,8 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura nos IC estabelecidos, receberam volume de água correspondente à umidade crítica de compactação (Quadro 1) e foram compactadas, utilizando uma prensa hidráulica.

3.2. Determinação da condutividade hidráulica em meio saturado e da micro e macroporosidade em resposta ao IC

Os tratamentos estudados corresponderam a um fatorial 2 x 4, sendo os dois Latossolos (LV e LVA) e quatro IC (0,7; 0,8; 0,9 e 1,0) indicados. Neste ensaio utilizou-se delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições.

As unidades experimentais, preparadas da forma previamente indicada, foram saturadas por 48 horas de baixo para cima, para eliminar as bolhas de ar presas nos poros. Seguidamente foram colocadas em permeômetros de carga constante, aplicando-se lâmina (ℓ) de 2,0 cm de espessura (Ferreira, 2002). Tão logo o escoamento permanente foi estabelecido, determinou-se o tempo (t) para o recolhimento de um volume de água (V). Consideraram-se adequados os valores de V e t que apresentaram reprodutibilidade em cinco determinações sucessivas.

Finalizado o ensaio, a unidade experimental foi imediatamente transferida à mesa de tensão para determinar a microporosidade (P_m). Na mesa de tensão, preparada para trabalhar com tensão de 60 cm de coluna de água, as amostras ficaram por 48 h, até atingir o equilíbrio (Bouma, 1973). Decorrido esse período, foram imediatamente pesadas e, após secagem em estufa de circulação de ar

forçada a 100°C, pesadas novamente. Esses dados foram utilizados para determinar a microporosidade (P_m) e a macroporosidade (P_M).

3.2.1. Cálculos

A condutividade hidráulica em meio saturado na temperatura de trabalho (K_e , $m\ s^{-1}$) foi calculada pela expressão:

$$K_e = -\frac{q}{i} \quad (2)$$

em que q é o fluxo ($m\ s^{-1}$) e i , o gradiente hidráulico ($m\ m^{-1}$). Numerador e denominador da equação 2 foram calculados utilizando as expressões:

$$q = \frac{V}{At} = \frac{4V}{\pi d^2 t} \quad (3)$$

$$i = -\left(\frac{\ell + L}{L}\right) = -\left(\frac{\ell}{L} + 1\right) \quad (4)$$

em que A é a área transversal da coluna de solo (m^2) de diâmetro d (m) e comprimento L (m).

O valor de K_e , determinado nas condições ambientais, foi recalculado para a temperatura de referência de 20°C (K_0) por meio da expressão:

$$K_0 = K_e \frac{\eta_e}{\eta_{20}} \quad (5)$$

em que η_e e η_{20} são a viscosidade dinâmica da água na temperatura ambiente e a 20°C, respectivamente (Pa s).

A microporosidade (P_m) foi calculada pela expressão:

$$P_m = \frac{V_{\text{Água}(60\text{cm})}}{V_{\text{Total}}} = \frac{M_{\text{Água}(60\text{cm})}}{D_{\text{Água}}} \frac{4}{\pi d^2 L} \quad (6)$$

em que V é o volume (m^3), M a massa (kg) e D a densidade ($kg\ dm^{-3}$).

A porosidade total para cada IC (P_{IC}) foi determinada pela relação:

$$P_{IC} = 1 - \frac{IC\ DP}{D_P} \quad (7)$$

em que DP e D_p representam a densidade máxima de Proctor e de partículas, respectivamente (kg dm^{-3}).

A macroporosidade (P_M) foi calculada por diferença:

$$P_M = P_{IC} - P_m \quad (8)$$

Os resultados experimentais foram analisados estatisticamente, utilizando o Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG). Compararam-se os solos e os IC. O quadro 3 apresenta o desdobramento dos graus de liberdade dos tratamentos. As variáveis dependentes foram relacionadas com o IC, para cada solo, por meio de equações de regressão.

Quadro 3 – Esquema da análise de variância da determinação de K_0 e da porosidade, considerando o solo e o índice de compactação (IC)

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
LV vs. LVA	1
IC d/LV	3
IC d/LVA	3
Resíduo	24

3.3. Determinação da resistência à penetração em resposta ao potencial da água do solo e ao IC

Os tratamentos estudados corresponderam a um fatorial 2 x 4 x 5, sendo os dois Latossolos (LV e LVA) e quatro IC (0,7; 0,8; 0,9 e 1,0) indicados, acrescidos de cinco potenciais de água do solo (-60, -100, -300, -1.000 e -15.000 hPa). Neste ensaio utilizou-se delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições.

As unidades experimentais, preparadas da forma previamente indicada, totalizando 15 para cada solo e IC, foram saturadas por 48 horas de baixo para cima, para eliminar as bolhas de ar presas nos poros. Seguidamente, cinco grupos de três cilindros de solo equilibraram-se aos potenciais de -60 e

-100 hPa, utilizando mesa de tensão, e de -300, -1.000 e -15.000 hPa, por meio de equipamento de membrana de pressão, por 72 horas.

Após equilíbrio determinou-se a resistência à penetração por meio de um penetrômetro de bancada Marconi, modelo MA-933 (Figura 1). O instrumento tem velocidade de avanço de $14,99 \text{ mm min}^{-1}$ e é dotado de registro automático de dados em computador. Os gráficos gerados permitiram determinar a resistência à penetração em toda a profundidade do cilindro de solo (3 cm). Devido à variabilidade encontrada nas determinações realizadas nas diferentes unidades experimentais, registraram-se dois valores de resistência à penetração: um deles a uma profundidade fixa de 1,5 cm (RP1,5) e o outro, na profundidade em que o valor máximo foi atingido (RMP).

1. Base de sustentação
2. Célula de carga
3. Chave geral
4. Tecla membrana que possibilita configurações eletrônicas para funções mecânicas
5. Display
6. Manípulo de fixação
7. Tecla membrana que possibilita configurações eletrônicas para funções mecânicas
8. Tecla membrana que possibilita configurações eletrônicas para funções mecânicas
9. Suporte de sustentação

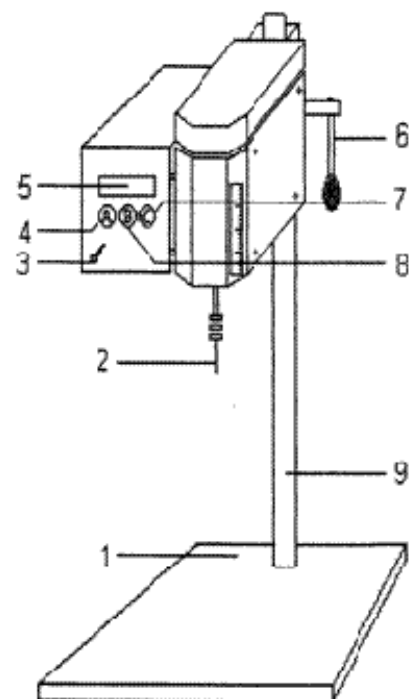


Figura 1 – Esquema do penetrômetro de bancada Marconi, modelo MA-933.

Os resultados experimentais foram analisados estatisticamente, utilizando o Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG). Compararam-se os solos, os potenciais e os IC. O quadro 4 apresenta o desdobramento dos graus de liberdade dos tratamentos. As variáveis dependentes RP1,5 e RMP foram relacionadas com a tensão e com IC, para cada solo, por meio de superfícies de resposta. Utilizou-se a tensão (T) e não o potencial (Ψ) para facilitar o ajuste das equações correspondentes ($T = -\Psi$). Utilizou-se também, como variável independente, o conteúdo de água base gravimétrica.

Quadro 4 – Esquema da análise de variância da determinação da resistência à penetração, considerando o solo, o potencial da água do solo e o índice de compactação (IC)

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
LV vs. LVA	1
Potencial e IC d/LV	19
Potencial e IC d/LVA	19
Resíduo	80

3.4. Determinação do Intervalo Hídrico Ótimo

Quatro curvas foram representadas para determinar o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), utilizando-se a densidade do solo (D_S) como variável independente. As variáveis dependentes foram a porosidade de aeração (P_A) e os conteúdos de água base volumétrica determinados a -100 hPa (θ_{CC}), a -15.000 hPa (θ_{PMP}) e para um valor i fixado de resistência à penetração (θ_{RPi}). Todas as variáveis dependentes foram expressas em $m^3 m^{-3}$. Resumidamente, o IHO foi determinado pelas curvas:

$$P_A = f(D_S) \quad (9)$$

$$\theta_{CC} = f(D_S) \quad (10)$$

$$\theta_{\text{PMP}} = f(D_S) \quad (11)$$

$$\theta_{\text{RPI}} = f(D_S) \quad (12)$$

A porosidade de aeração mínima para o normal crescimento das plantas é considerada de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Assim, P_A foi calculada pela equação:

$$P_A = P_{\text{IC}} - 0,10 \quad (13)$$

em que P_{IC} foi determinada pela equação 7.

No cálculo do conteúdo de água base volumétrica utilizou-se a relação:

$$\theta = U \frac{D_S}{D_{\text{Água}}} \quad (14)$$

em que U é a umidade base gravimétrica (kg kg^{-1}).

As quatro funções indicadas pelas equações 9, 10, 11 e 12 foram representadas graficamente numa mesma figura. O IHO foi delimitado, na porção superior, pelas funções das equações 9 ou 10 e, na porção inferior, pelas funções 11 ou 12. A superfície entre o menor valor das equações 9 ou 10 e o maior valor, entre as equações 11 ou 12, corresponde ao IHO.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Condutividade hidráulica em meio saturado, macro e microporosidade

Neste trabalho, o menor índice de compactação utilizado ($IC = 0,70$), quando multiplicado pelas respectivas densidades máximas de Proctor (Quadro 1), resultou em valores de $1,15$ e $0,96 \text{ kg dm}^{-3}$ para o LV e o LVA, respectivamente. Na comparação com aqueles apresentados na caracterização, determinados pelo método da proveta, observam-se valores de $1,16$ e $0,97 \text{ kg dm}^{-3}$ (Quadro 1). Isso sugere que, em ensaios de compactação de solos, valores de IC próximos a $0,70$ seriam apropriadamente utilizados como representativos de condições próximas às normalmente encontradas em Latossolos não cultivados. A determinação da densidade do solo pelo método da proveta aproxima-se da encontrada por outros métodos, quando são analisados Latossolos e Neossolos Quartzarênicos.

Os valores da condutividade hidráulica em meio saturado (K_0), da macroporosidade (P_M) e da microporosidade (P_m), determinados em resposta ao IC, para os dois solos estudados (LV e LVA), são apresentados no quadro 5. Na comparação entre solos, ainda que com médias próximas, observam-se diferenças estatisticamente significativas pelo teste F. Essa significância pode

ser atribuída, fundamentalmente, aos baixos valores dos coeficientes de variação: 3,74, 1,75 e 0,60 % para as três determinações, respectivamente. O caráter latossólico desses solos, a textura mais argilosa e o teor de matéria orgânica, 2,15 vezes superior no LVA (Quadro 1), seriam responsáveis pelos maiores valores de K_0 , P_M e P_m (Quadro 5).

Quadro 5 – Densidade efetiva do solo (DE), condutividade hidráulica em meio saturado (K_0), macroporosidade (P_M) e microporosidade (P_m), considerando o solo e o índice de compactação (IC) estudados

Solo	IC	DE	K_0	P_M	P_m
		kg dm ⁻³	cm h ⁻¹	m ³ m ⁻³	
LV	0,70	1,15	13,90	0,224	0,370
	0,80	1,32	11,18	0,159	0,375
	0,90	1,48	4,13	0,097	0,380
	1,00	1,64	0,40	0,035	0,385
	Média Geral ^{1/}		7,40B	0,129B	0,377B
LVA	0,70	0,96	14,20	0,235	0,404
	0,80	1,10	11,83	0,174	0,413
	0,90	1,23	4,43	0,119	0,418
	1,00	1,37	0,53	0,048	0,437
	Média Geral ^{1/}		7,74A	0,144A	0,418A

^{1/} Letras diferentes na coluna indicam diferenças estatisticamente significativas a 1% pelo teste F.

A K_0 decresceu acentuadamente com o IC nos dois solos estudados (Figura 2). Como o movimento de água em meio saturado se realiza através dos grandes poros, a diminuição de K_0 deveria associar-se com tendência semelhante na macroporosidade. A figura 3, apresentando a resposta de P_M e P_m ao IC, mostra isso claramente. Também, quando relacionada K_0 com P_M e P_m , os coeficientes de correlação linear simples foram de 0,978** e -0,351^{ns}, respectivamente.

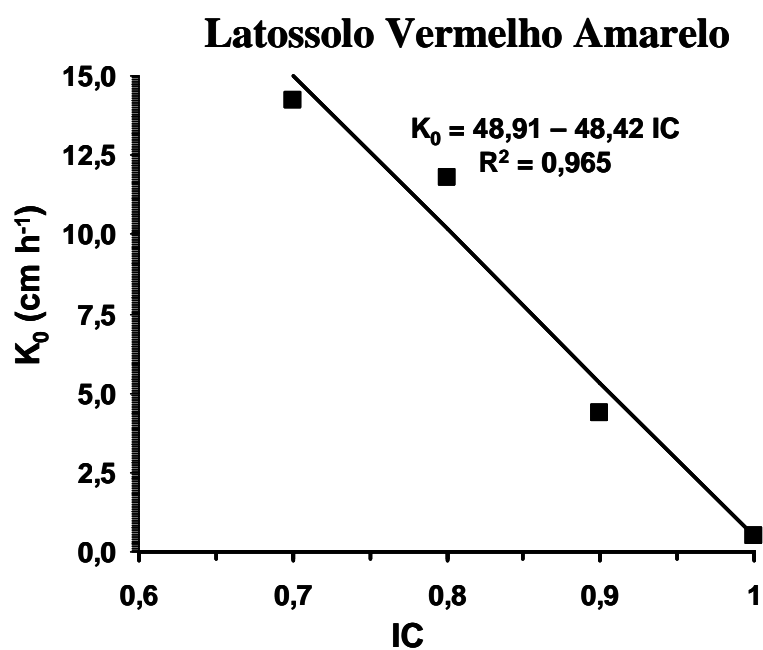
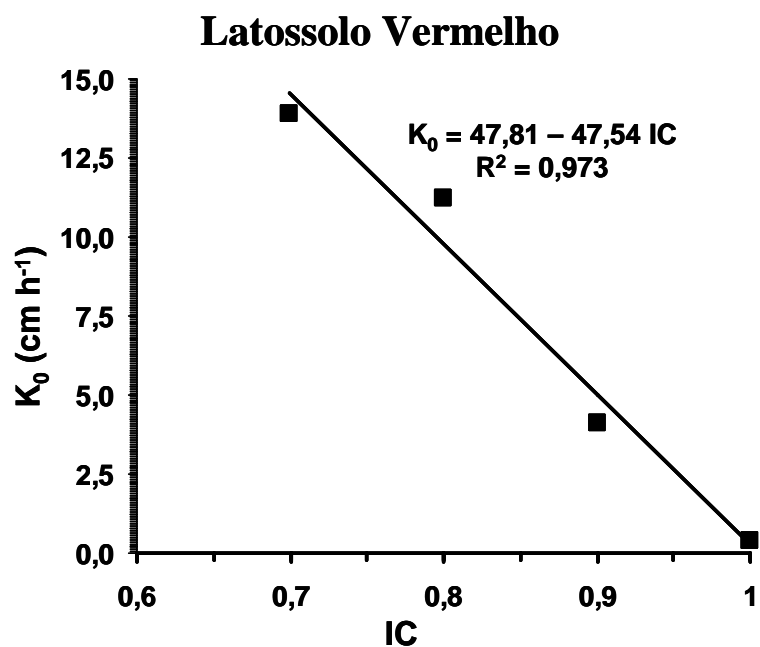


Figura 2 – Condutividade hidráulica em meio saturado (K_0) em resposta ao índice de compactação (IC), em amostras dos solos estudados. Os coeficientes das equações de regressão são significativos a 1 % pelo teste t.

Da análise das duas equações de regressão ajustadas para cada solo (Figura 3), verifica-se que P_M apresenta declividade com sinal negativo, sendo positiva para P_m . Por outra parte, relacionando os módulos das declividades de P_M e P_m (P_M/P_m), os valores calculados são de 12,3 e 5,9 para LV e LVA, respectivamente. Isso indica que a diminuição da macroporosidade não é acompanhada por incremento equivalente da microporosidade. O resultado é a diminuição acentuada da porosidade total.

Os Latossolos apresentam, fundamentalmente, dois tipos de poros: os grandes, localizados entre os agregados (interagregados), e os muito pequenos, situados no interior dos agregados (intra-agregados) (Figura 4). Nesses solos é mínima a proporção de poros de diâmetro intermediário (mesoporos). Assim, a energia utilizada no ensaio de Proctor pouco altera a porosidade intra-agregados e modifica acentuadamente a porosidade interagregados.

Pelo método de laboratório geralmente utilizado no Brasil, denominam-se macroporos aqueles que perdem água quando aplicada uma tensão de 60 hPa, e microporos, aqueles capazes de reter água nessa sucção. Pelo observado, os microporos responderiam mais à composição granulométrica do solo e, os macroporos, estariam mais relacionados com a disposição dos agregados, isto é, com sua estrutura. Em conseqüência, eventualmente, poderiam ser consideradas mais apropriadas as denominações de *porosidade estrutural* e *porosidade textural* em substituição de macro e microporosidade, respectivamente. Assim, a porosidade estrutural é a que sofre alterações pelo manejo do solo, como observado por Tamari (1994), Richard et al. (2001) e Tarawally et al. (2004).

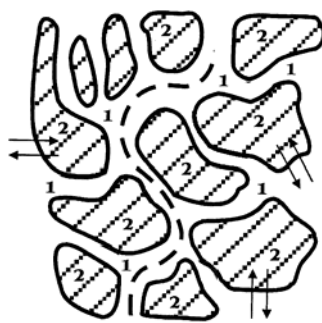


Figura 4 – Representação esquemática do sistema poroso dos Latossolos, mostrando os poros interagregados (1) e os intra-agregados (2), (Ruiz, 2003).

4.2. Resistência à penetração

A resistência à penetração foi determinada na totalidade da unidade experimental, de 3 cm de profundidade. A variabilidade resultante do preparo das unidades experimentais e a sensibilidade do equipamento utilizado levaram à determinação de valores máximos de resistência à penetração, em diferentes profundidades dos cilindros de solo. Em consequência, utilizaram-se dois resultados experimentais: a resistência à penetração na profundidade de 1,5 cm (RP1,5) e a resistência máxima à penetração (RMP), independentemente da profundidade em que esse valor fosse atingido.

O quadro 6 apresenta as medidas de posição e de dispersão da profundidade da RPM nos dois Latossolos estudados. Das 60 observações para cada solo (LV e LVA), resultantes de quatro IC, cinco potenciais e três repetições, determinaram-se valores muito próximos para a média da profundidade (2,28 e 2,24 cm) e para a amplitude (2,00 e 2,20 cm). O coeficiente de variação foi superior no LVA (29,02 %) em relação ao LV (25,35 %). Como indicado, as diferenças podem ser atribuídas, fundamentalmente, ao preparo das unidades experimentais, incluindo-se, nesse caso, a compactação para atingir os IC de trabalho e o equilíbrio nos equipamentos de mesa de tensão e placa de pressão, a fim de chegar aos potenciais preestabelecidos.

Quadro 6 – Medidas de posição e de dispersão da profundidade de resistência máxima à penetração nos solos estudados

Medida	LV	LVA
Número de observações	60	60
Média geral (cm)	2,28	2,24
Valor máximo (cm)	3,00	3,00
Valor mínimo (cm)	1,00	0,80
Amplitude (cm)	2,00	2,20
Desvio-padrão (cm)	0,58	0,65
Coefficiente de variação (%)	25,35	29,02

Os valores das duas expressões da resistência à penetração (RP1,5 e RMP), relacionados com o IC e a tensão de trabalho (T), são apresentados no quadro 7. Optou-se por trabalhar com valores de T e não de potencial matricial porque os primeiros, numericamente iguais mas com sinal positivo, apresentam maior facilidade no ajuste de modelos de regressão. Nesse caso, pelo fato de contar com duas variáveis dependentes para cada solo (IC e T), determinaram-se superfícies de resposta (Quadro 8). Também foram determinadas superfícies de resposta substituindo T pelo conteúdo de água base gravimétrica (U) (Quadro 8).

Da comparação entre os dois Latossolos observa-se que, independentemente da variável em foco, o LV sempre apresentou valores de resistência à penetração superiores aos do LVA (Quadro 7). Comparando as médias para solos, verifica-se que o primeiro mostrou resistência à penetração 43 % e 40 % maior que o LVA para RP1,5 e RMP, respectivamente. Como os tratamentos levaram em consideração o potencial e não o conteúdo de água do solo, a diferença na retenção de água nos potenciais de trabalho (Quadro 1) justifica o comportamento apontado. Valores coincidentes foram publicados por Beltrame et al. (1981), Castro (1995), Orlando et al. (1998) e Borges et al. (1999).

Quadro 7 – Densidade efetiva (DE), conteúdo de água base gravimétrica (U), resistência à penetração a 1,5 cm de profundidade (RP1,5) e resistência máxima à penetração (RMP), considerando o solo, o índice de compactação (IC) e a tensão da água do solo (T)

Solo	IC	DE	T	U	RP1,5	RMP
		kg dm ⁻³	hPa	kg kg ⁻¹	MPa	
LV	0,70	1,15	60	0,346	0,061	0,193
			100	0,276	0,141	0,266
			300	0,206	0,219	0,342
			1.000	0,186	0,318	0,541
			15.000	0,170	1,118	1,899
	0,80	1,32	60	0,346	0,190	0,316
			100	0,276	0,242	0,368
			300	0,206	0,415	0,565
			1.000	0,186	0,743	0,842
			15.000	0,170	2,529	3,132
	0,90	1,48	60	0,346	0,392	0,541
			100	0,276	0,492	0,591
			300	0,206	0,743	0,842
			1.000	0,186	0,918	1,018
			15.000	0,170	3,688	4,014
	1,00	1,64	60	0,346	0,614	0,746
			100	0,276	0,743	0,842
			300	0,206	1,124	1,220
			1.000	0,186	1,223	1,422
			15.000	0,170	4,217	4,470
		Média Geral ^{1/}			1,007A	1,209A
LVA	0,70	0,96	60	0,417	0,114	0,217
			100	0,359	0,167	0,292
			300	0,278	0,342	0,442
			1.000	0,256	0,515	0,740
			15.000	0,235	1,449	1,773
	0,80	1,10	60	0,417	0,114	0,193
			100	0,359	0,141	0,219
			300	0,278	0,219	0,392
			1.000	0,256	0,442	0,743
			15.000	0,235	1,501	1,902
	0,90	1,23	60	0,417	0,141	0,292
			100	0,359	0,289	0,368
			300	0,278	0,489	0,614
			1.000	0,256	0,895	0,995
			15.000	0,235	2,077	2,303
	1,00	1,37	60	0,417	0,466	0,591
			100	0,359	0,617	0,743
			300	0,278	0,945	1,041
			1.000	0,256	1,091	1,223
			15.000	0,235	2,028	2,177
		Média Geral ^{1/}			0,702B	0,863B

^{1/} Letras diferentes na coluna indicam diferenças estatisticamente significativas a 1 % pelo teste F.

Quadro 8 – Superfícies de resposta relacionando a resistência à penetração a 1,5 cm de profundidade (RP1,5) e a resistência máxima à penetração (RMP) com o índice de compactação (IC) e a tensão (T) ou o conteúdo de água do solo, base gravimétrica (U)

Solo	Superfície de Resposta	R ²
Resistência à Penetração a 1,5 cm de Profundidade		
LV	$RP_{1,5} = -0,853 + 1,249^{\#} IC + 0,0000220 T - 0,0440^{**} T^{0,5} + 0,0743^{**} IC T^{0,5}$	0,988
LVA	$RP_{1,5} = 19,135 + 26,397^{\#} IC - 45,136^{\#} IC^{0,5} - 0,0000914^{\#} T + 0,0252^{*} T^{0,5}$	0,970
LV	$RP_{1,5} = 31,085 + 19,359^{**} IC + 170,135^{**} U - 153,085^{**} U^{0,5} - 31,725^{**} IC U^{0,5}$	0,722
LVA	$RP_{1,5} = 36,754 + 6,089^{\#} IC + 117,655^{**} U - 133,851^{**} U^{0,5} - 7,706^{\circ} IC U^{0,5}$	0,840
Resistência Máxima à Penetração		
LV	$RMP = -0,899 + 1,440^{\#} IC + 0,0000444 T - 0,0298^{\#} T^{0,5} + 0,0579^{**} IC T^{0,5}$	0,992
LVA	$RMP = -1,251 + 1,612^{*} IC - 0,000112^{\circ} T + 0,0294^{*} T^{0,5}$	0,975
LV	$RMP = 42,290 + 15,871^{**} IC + 200,425^{**} U - 190,022^{**} U^{0,5} - 25,381^{**} IC U^{0,5}$	0,720
LVA	$RMP = 44,800 + 3,307^{\circ} IC + 133,653^{**} U - 156,730^{**} U^{0,5} - 3,067^{\circ} IC U^{0,5}$	0,855

[°], [#], ^{*}, ^{**}: Significativo a 50, 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste t.

Para facilitar a visualização das respostas ao IC e à tensão (ou conteúdo de água do solo), as superfícies de resposta apresentadas no quadro 8 sofreram cortes nos valores correspondentes a cada IC de trabalho (0,70; 0,80; 0,90 e 1,00). Esses cortes, que podem ser definidos como a representação gráfica do perfil de um objeto em três dimensões, são apresentados nas figuras 5 e 6. Nelas relaciona-se a RP1,5 com a tensão e o conteúdo de água do solo, respectivamente.

Considerando que a tensão apresenta sinal oposto ao potencial da água do solo, divergentes também são as curvas de resposta do RP1,5, com tendência ao crescimento quando representadas em função da tensão (Figura

5) e decrescentes quando utilizado o conteúdo de água como variável independente (Figura 6). Pela análise das figuras verifica-se, imediatamente, a resposta diferenciada dos dois solos aos IC testados. O LV apresenta diferenças mais acentuadas que o LVA e atinge valores superiores de RP, até superar 3 MPa. Essa resposta é coerente com os valores da densidade máxima de Proctor, determinada na caracterização. O LV e o LVA tiveram valores de 1,64 e 1,37 kg dm⁻³, respectivamente (Quadro 1).

As diferenças entre solos são mais bem observadas na figura 6, em que RP_{1,5} é representada em função do conteúdo de água. Em todos os potenciais de trabalho, a umidade em equilíbrio do material mais argiloso (LVA) foi superior à do LV (Quadro 1), justificando a menor diferença entre o IC e os menores valores da RP_{1,5}. Beltrame et al. (1981) verificaram que em resposta ao incremento da umidade do solo ocorre variação, em sentido inverso, na resistência à penetração. Isso devido a que a água participa diminuindo a coesão entre as partículas do solo.

Do ponto de vista físico, as variações no conteúdo de água no solo provocam modificações na consistência, pelo grau de coesão da massa de solo e da adesão da água aos constituintes da fase sólida. Assim, os solos são mais resistentes às pressões na baixa umidade do solo e mais susceptíveis à compactação, com alta umidade do solo (Horn et al., 1995).

A resposta da RMP, mostrada nas figuras 7 e 8, foi semelhante àquela da RP_{1,5} (Figuras 5 e 6), com valores ligeiramente superiores de resistência à penetração para as duas variáveis independentes testadas (Quadro 7).

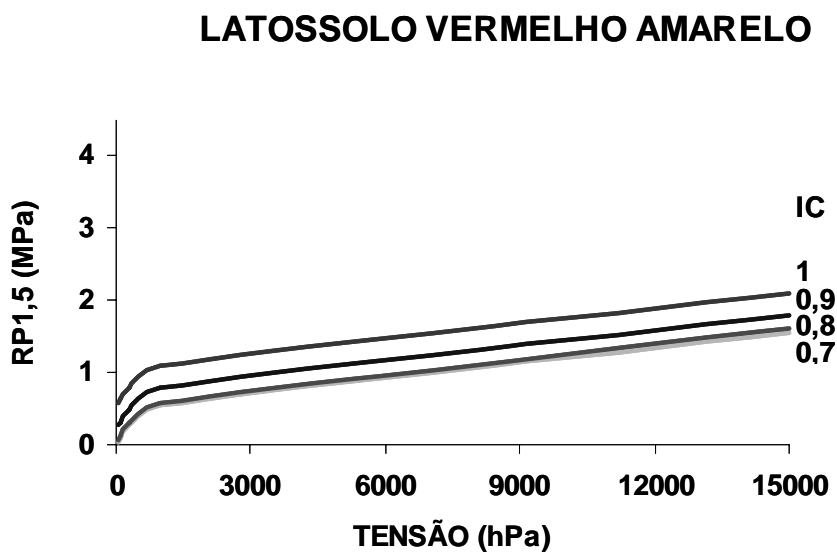
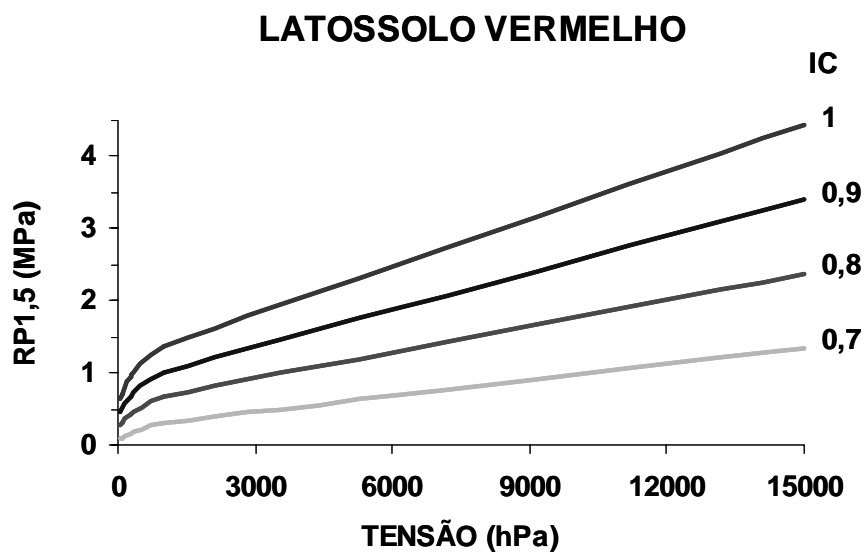


Figura 5 – Resistência à penetração determinada a 1,5 cm (RP1,5) em resposta à tensão da água do solo, considerando o índice de compactação (IC), em amostras dos solos estudados.

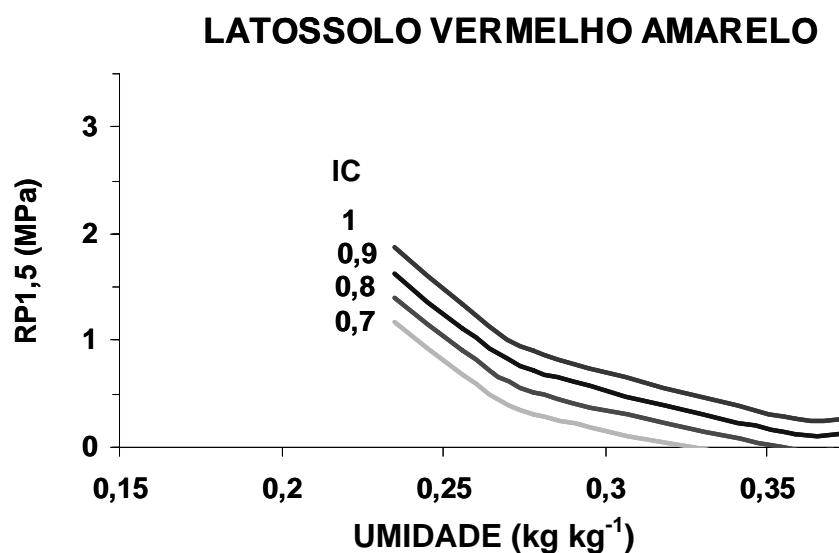
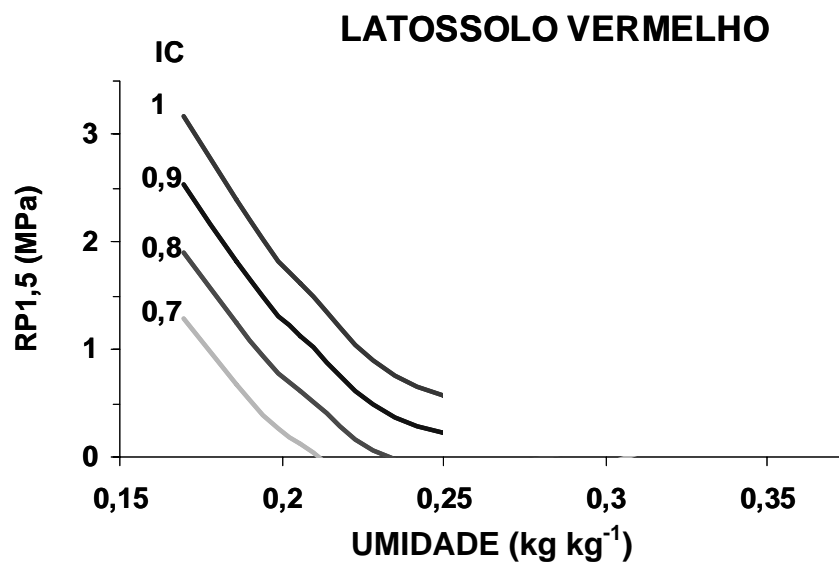


Figura 6 – Resistência à penetração determinada a 1,5 cm (RP1,5) em resposta ao conteúdo de água do solo, considerando o índice de compactação (IC), em amostras dos solos estudados.

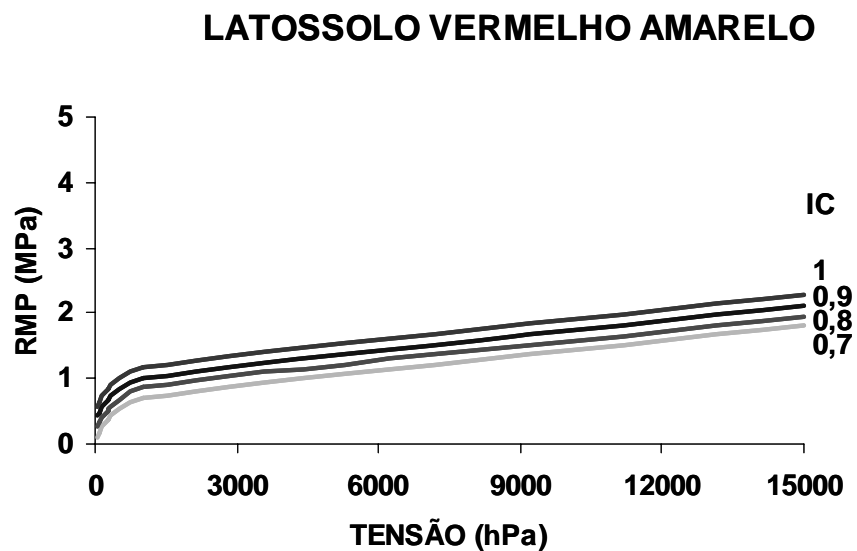
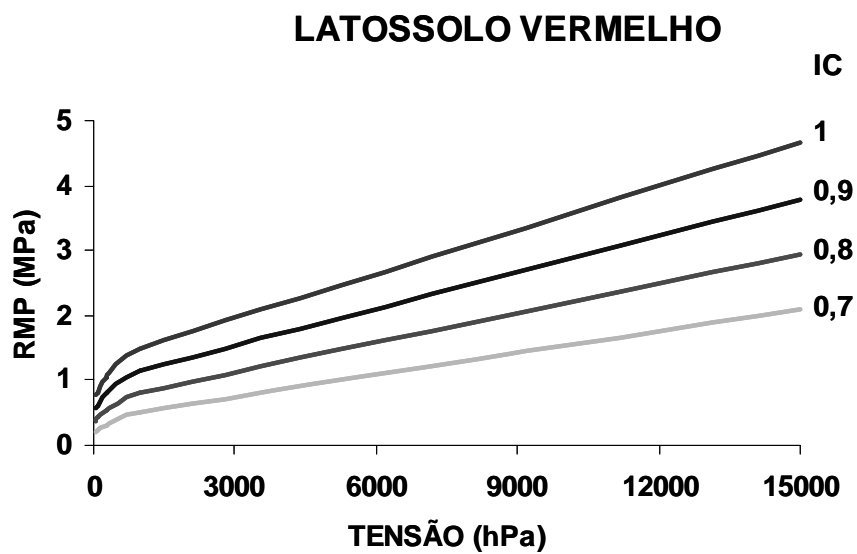


Figura 7 – Resistência máxima à penetração (RMP) em resposta à tensão da água do solo, considerando o índice de compactação (IC), em amostras dos solos estudados.

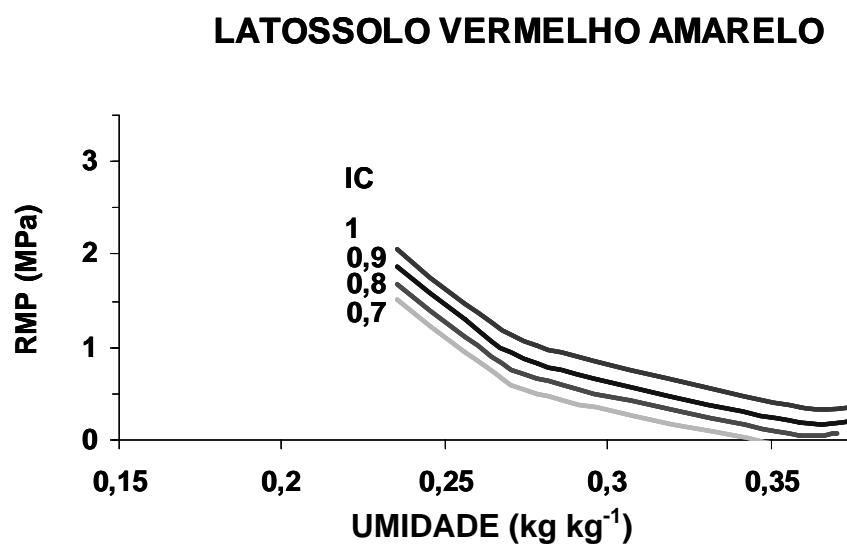
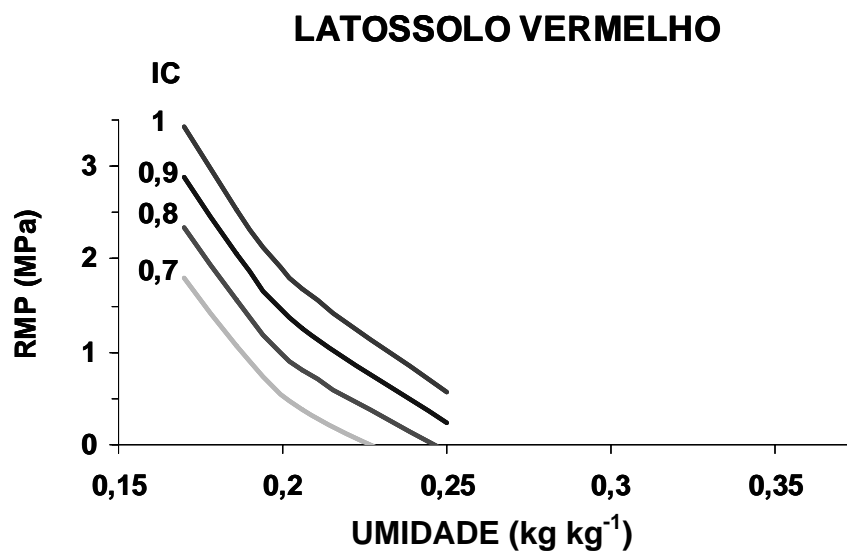


Figura 8 – Resistência máxima à penetração (RMP) em resposta ao conteúdo de água do solo, considerando o índice de compactação (IC), em amostras dos solos estudados.

4.3. Intervalo Hídrico Ótimo

No intervalo hídrico ótimo (IHO), a variável independente densidade do solo (D_S) foi calculada multiplicando o índice de compactação (IC) pela densidade máxima de Proctor, determinada para cada solo (Quadro 1). Como indicado, o IHO é uma área delimitada por relações de quatro variáveis dependentes com a D_S : porosidade de aeração (P_A), conteúdo de água base volumétrica determinada a -100 hPa (θ_{CC}) e a -15.000 hPa (θ_{PMP}) e conteúdo de água base volumétrica que permite manter a resistência à penetração num valor prefixado i (θ_{RPI}).

Uma das limitantes à produtividade, assim estabelecida no IHO, é a diminuição da P_A para valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Considera-se que esse seria o volume de ar mínimo no sistema poroso, necessário para oxigenar adequadamente o sistema radicular das plantas, sem comprometimento do seu crescimento e desenvolvimento. Esse limite, por enquanto estabelecido de forma genérica (Grable & Siemer, 1968; Xu et al., 1992), exigiria pesquisas para adequá-lo às diferentes espécies vegetais e, ainda, aos variados materiais genéticos dentro de cada espécie. A P_A , calculada em concordância com a equação 13, é apresentada no quadro 9, para o LV e para o LVA.

O conteúdo de água, determinado a -100 e a -15.000 hPa, permite delimitar a faixa de água *disponível* para as plantas. Essa determinação é normalmente realizada utilizando o equipamento de placa de pressão (Richards, 1949). Atingido o equilíbrio com a pressão imposta, calcula-se o conteúdo de água base gravimétrica (Quadro 1). Estima-se então o conteúdo de água base volumétrica, o qual é calculado utilizando a equação 14 (Quadro 9).

Na realidade, a denominada água disponível para as plantas corresponde ao intervalo de retenção de água entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), que não são verdadeiras constantes (Cassel & Nielsen, 1986). A CC depende, fundamentalmente, da textura e da estrutura do solo, e o PMP responde, principalmente, à espécie vegetal e à textura do solo (Ruiz et al., 2003).

Quadro 9 – Densidade do solo (D_s), porosidade total reduzida em $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (P_A), conteúdo de água base volumétrica a -100 hPa (θ_{CC}), conteúdo de água base volumétrica a -15.000 hPa (θ_{PMP}) e conteúdo de água determinado para resistência à penetração de 1 MPa (θ_{RP1MPa}) ou de 2 MPa (θ_{RP2MPa}), considerando o índice de compactação (IC)

Solo	IC	D_s kg dm^{-3}	P_A	θ_{CC}	θ_{PMP} $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	θ_{RP1MPa}	θ_{RP2MPa}
Resistência à Penetração a 1,5 cm de Profundidade							
LV	0,70	1,148	0,494	0,317	0,195	0,197	
	0,80	1,312	0,436	0,362	0,223	0,241	
	0,90	1,476	0,378	0,407	0,251	0,275	
	1,00	1,640	0,320	0,453	0,279	0,376	
LVA	0,70	0,959	0,539	0,344	0,225	0,235	
	0,80	1,096	0,488	0,393	0,258	0,269	
	0,90	1,233	0,436	0,443	0,290	0,313	
	1,00	1,370	0,385	0,492	0,322	0,370	
Profundidade de Resistência Máxima à Penetração							
LV	0,70	1,148	0,494	0,317	0,195	0,208	0,195
	0,80	1,312	0,436	0,362	0,223	0,243	0,230
	0,90	1,476	0,378	0,407	0,251	0,277	0,267
	1,00	1,640	0,320	0,453	0,279	0,405	0,333

Para efeito de cálculo, o PMP é fixado em -15.000 hPa . Esse valor é questionável, ao igualar todas as espécies vegetais e solos, porém seu uso continua generalizado.

Quanto à CC, tradicionalmente tem sido utilizado o conteúdo de água em equilíbrio a -333 hPa (Cassel & Nielsen, 1986). Esse valor, próximo da CC em solos de clima temperado, com predomínio de argilas silicatadas, é inadequado quando focalizados os solos característicos das regiões tropicais e úmidas, independentemente da sua composição granulométrica. Reichardt (1988), entre outros autores, mostrou que a capacidade de campo nos solos brasileiros localizava-se no intervalo de aproximadamente -60 a -100 hPa , com valores maiores de potencial nos materiais mais arenosos e menores nos mais argilosos. Ruiz et al. (2003) concluíram que o uso de -333 hPa para

estimar a CC é incorreto, após análise de 88 Latossolos e Neossolos Quartzarênicos.

O conteúdo de água base volumétrica que permite manter a resistência à penetração num valor prefixado i (θ_{RPi}), quarta variável a ser levada em consideração para a determinação do IHO, foi calculado a partir das superfícies de resposta mostradas no quadro 8. Utilizando as funções $RP = f(IC, U)$, determinou-se o conteúdo de água base gravimétrica (U) necessário para permitir resistência à penetração (RP) de 1 ou de 2 MPa, nos índices de compactação de trabalho (IC). θ_{RPi} foi calculado utilizando a equação 14 (Quadro 9).

Para comparar o LV com o LVA, fixou-se $RP_{1,5}$ em 1 MPa. No confronto do IHO para 1 MPa e para 2 MPa utilizaram-se somente curvas do LV (RMP), pois a resistência à penetração do LVA dificilmente superou 2 MPa (Quadro 7). A opção por $RP_{1,5}$ ou por RMP foi realizada para mostrar a resposta das duas variáveis dependentes utilizadas no ensaio de compactação.

Os valores apresentados no quadro 9 foram utilizados para ajustar equações de regressão. P_A , θ_{CC} e θ_{PMP} relacionaram-se com D_S por meio de um modelo linear, e θ_{RPi} por um modelo curvilíneo da forma $\theta_{RPi} = 1/(a + b D_S)$ (Quadro 10). As equações de regressão foram utilizadas para delimitar o IHO dos solos estudados.

As equações que representaram $P_A = f(D_S)$ e $\theta_{RPi} = f(D_S)$ (Quadro 10) foram utilizadas para determinar a densidade do solo crítica (D_{SC}), definida como aquela que limita o IHO. Sendo esse ponto a interseção entre valores das duas equações indicadas, o cálculo de D_{SC} realiza-se igualando P_A e θ_{RPi} . Os valores calculados são apresentados no quadro 11.

Essas determinações são sintetizadas nas figuras 9 e 10, que apresentam as curvas ajustadas (Quadro 10), o IHO e a D_{SC} (Quadro 11). Como se pode observar nas figuras, o IHO é limitado, na porção superior da área, pela disponibilidade de água na capacidade de campo ou pela restrição à aeração do sistema radicular. Na porção inferior, as limitações se devem, fundamentalmente, à resistência à penetração e, para valores baixos de densidade do solo, ocasionalmente, ao conteúdo de água no ponto de murcha permanente.

Quadro 10 – Equações de regressão utilizadas na determinação do intervalo hídrico ótimo, relacionando as quatro variáveis dependentes com a densidade do solo (D_S)

Solo	Equação de Regressão	R^2
Porosidade do solo reduzida em $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$		
LV	$P_A = 0,900 - 0,353 D_S$	0,999
LVA	$P_A = 0,894 - 0,372 D_S$	0,999
Conteúdo de água base volumétrica a -100 hPa		
LV	$\theta_{CC} = 0,276 D_S$	0,999
LVA	$\theta_{CC} = 0,359 D_S$	0,999
Conteúdo de água base volumétrica a -15.000 hPa		
LV	$\theta_{PMP} = 0,170 D_S$	0,999
LVA	$\theta_{PMP} = 0,235 D_S$	0,999
Conteúdo de água base volumétrica para $RP_{1,5}$ de 1 MPa		
LV	$\theta_{RP1,5-1MPa} = 1/(10,427 - 4,698 D_S)$	0,972
LVA	$\theta_{RP1,5-1MPa} = 1/(7,880 - 3,788 D_S)$	0,999
Conteúdo de água base volumétrica para RMP de 1 e 2 MPa		
LV	$\theta_{RMP-1MPa} = 1/(10,167 - 4,602 D_S)$	0,972
LV	$\theta_{RMP-2MPa} = 1/(9,985 - 4,253 D_S)$	0,998

Quadro 11 – Densidade do solo crítica (D_{SC}) e índice de compactação (IC) calculados para a resistência à penetração de 1MPa determinada a 1,5 cm de profundidade ($RP_{1,5}$), no LV e LVA, e para a resistência máxima à penetração de 1 e 2 MPa (RMP), no LV

Solo	$RP_{1,5}$	RMP	D_{SC}	IC
	-----MPa-----		kg dm^{-3}	
LV	1		1,591	0,97
LVA	1		1,383	1,01
LV		1	1,577	0,96
LV		2	1,625	0,99

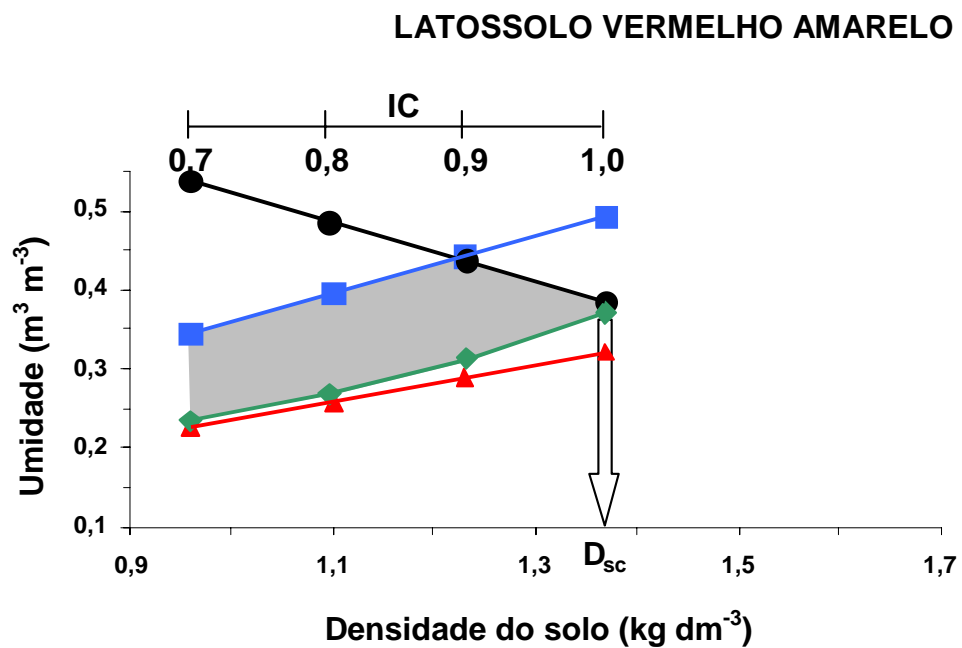
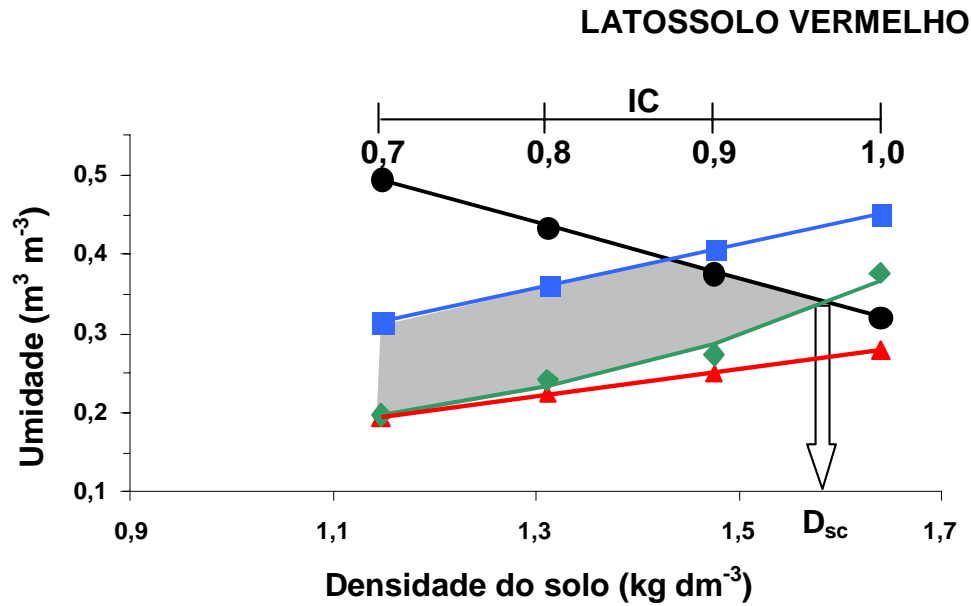


Figura 9 – Conteúdo de água base volumétrica a -100 (CC) e a -15.000 hPa (PMP), porosidade total reduzida em $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PA) e resistência à penetração de 1 MPa determinada a 1,5 cm (RP1,5) em resposta à densidade dos solos estudados. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo (IHO) e a densidade do solo crítica (D_{sc}), a qual limita o IHO.

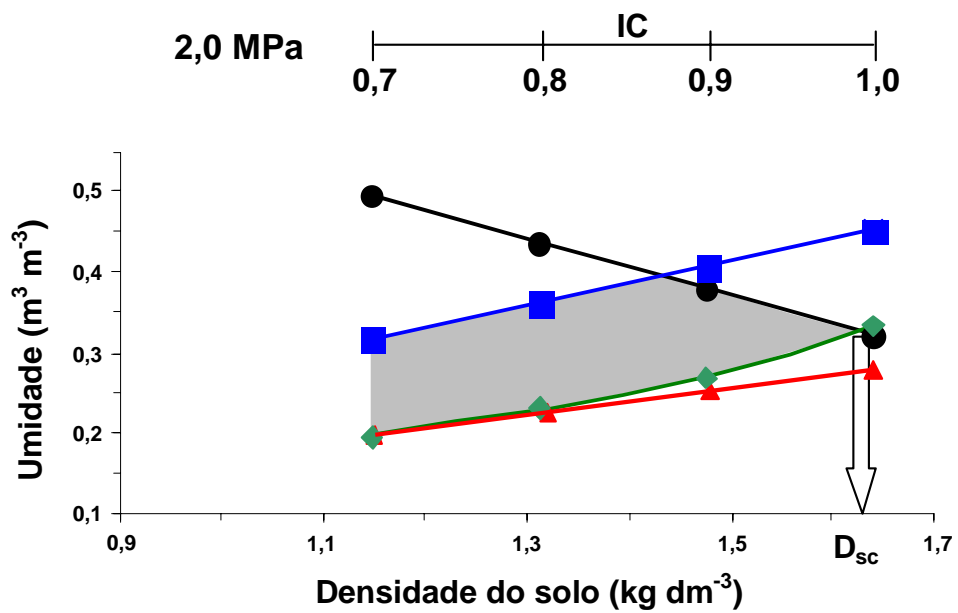
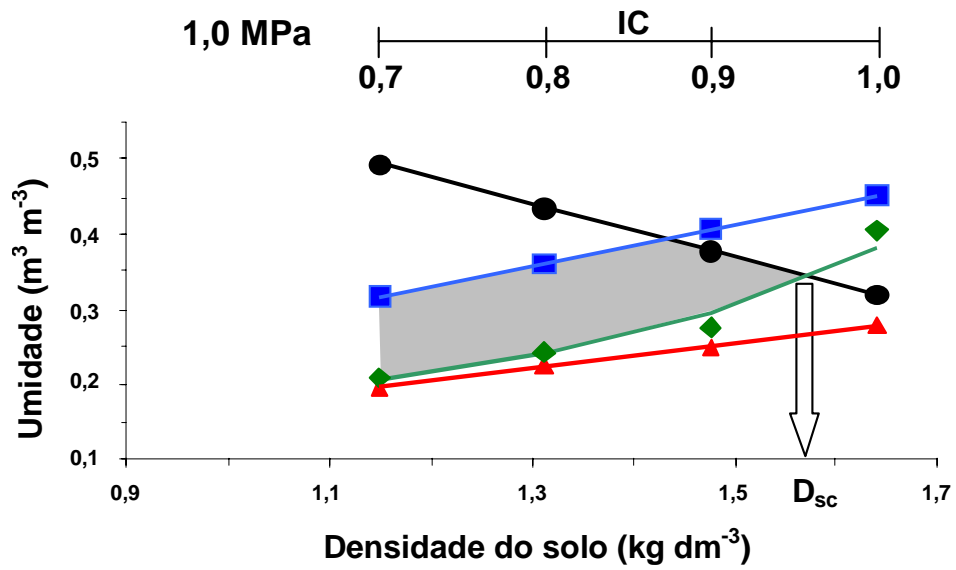


Figura 10 – Conteúdo de água base volumétrica a -100 (CC) e a -15.000 hPa (PMP), porosidade total reduzida em 0,10 m³ m⁻³ (PA) e resistência à penetração de 1 e de 2 MPa determinada na profundidade de máxima resistência à penetração (RMP) em resposta à densidade no Latossolo Vermelho. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo (IHO) e a densidade do solo crítica (D_{sc}), a qual limita o IHO.

Na porção superior do IHO, a disponibilidade de água na capacidade de campo é limitante nas menores densidades do solo. Assim que a compactação é incrementada, a restrição à aeração delimita o IHO (Figuras 9 e 10). Comparando as curvas que representam P_A e θ_{CC} em função da D_S (Quadro 10), determinam-se valores de D_S de 1,431 e 1,223 kg dm^{-3} para o LV e LVA, respectivamente, para a transição apontada. Esses valores, claramente discrepantes, transformam-se em índices de compactação de 0,87 e 0,89, quando divididos pela densidade máxima de Proctor (Quadro 1). A confluência de resultados é indicativa da importância do uso de valores relativos na comparação de características de solos, em que os valores absolutos apresentam acentuada divergência.

Na porção inferior do IHO o conteúdo de água determinado para a resistência à penetração de 1 MPa foi limitante, em relação ao conteúdo de água determinado no ponto de murcha permanente (Figuras 9 e 10). Assim que se incrementa a resistência à penetração para, por exemplo, 2 MPa, a faixa é expandida e, nessas circunstâncias, o conteúdo de água no ponto de murcha permanente pode transformar-se em fator limitante do IHO para baixos valores de D_S (Figura 10).

No IHO estabelecem-se limitações à produtividade quando P_A diminui a valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Esse limite, como apontado, deveria ser revisado para adequá-lo às diferentes espécies vegetais e, ainda, aos variados materiais genéticos dentro de cada espécie. De forma semelhante trabalha-se, em geral, com resistência à penetração de 2 MPa como referência. Esse limite, considerado um valor médio para as diversas espécies, exige pesquisas para estabelecer com maior exatidão valores condizentes com as características das plantas cultivadas.

A densidade do solo crítica incrementou com a diminuição do teor de argila e com o aumento da resistência à penetração (Quadro 11). Essa resposta é esperada, considerando que a densidade dos solos arenosos é maior que a dos argilosos. Por sua vez, para o mesmo solo, maior densidade resulta em menor porosidade e maior exigência de pressão para o crescimento das raízes

nesse meio. Novamente, da comparação das densidades do solo com os índices de compactação, observam-se resultados mais próximos com a utilização destes últimos.

Pelos resultados apresentados, neste capítulo, pode-se postular que a utilização de IC é mais apropriada que o uso de valores de densidade do solo. O IC inicial de trabalho, de 0,70, correspondeu aproximadamente ao valor da densidade do solo peneirado, determinada pelo método da proveta (Quadro 1). Assim, valores de IC na faixa de 0,70 a 0,85, aproximadamente, não ofereceriam restrições ao crescimento das plantas. Valores superiores indicariam, inicialmente, restrições à aeração do solo e, quando na faixa de 0,95 a 1,00, impedimento ao crescimento de raízes pela resistência à penetração.

5. CONCLUSÕES

- A condutividade hidráulica e a macroporosidade são reduzidas proporcionalmente com o incremento do índice de compactação (IC).
- O incremento da microporosidade com o IC é inferior à diminuição da macroporosidade em resposta à compactação.
- A resistência à penetração aumenta com o incremento da compactação e a diminuição do potencial da água do solo. O Latossolo mais argiloso (LVA), com maior conteúdo de água nos potenciais de trabalho, apresenta menores valores de resistência à penetração e diferenças menos acentuadas, em resposta ao potencial, que o LV.
- A determinação do intervalo hídrico ótimo é complemento adequado para diminuir perdas de produtividade em resposta à compactação, por estabelecer limites de restrição à aeração do sistema radicular e de resistência do solo ao crescimento das raízes.
- A convergência de resultados é indicativa da importância do uso de valores relativos, como o IC, na comparação de características de solos, em que os valores absolutos apresentam acentuada divergência.
- IC na faixa de 0,70 a 0,85 não oferece restrições ao crescimento das plantas. Valores superiores indicam, inicialmente, restrições à aeração do solo e, quando na faixa de 0,95 a 1,00, impedimento ao crescimento de raízes pela resistência à penetração.

6. REFERÊNCIAS

ACHÁ, L.P. Latossolo Vermelho-Amarelo de tabuleiro no Espírito Santo: formação, características e classificação. Recife, UFRPE, 1976. 116p. (Tese Doutorado)

ALVARENGA, R.C. Potencialidades de adubos verdes para conservação e recuperação de solos. Viçosa, UFV, 1993. 112p. (Tese de Doutorado)

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSSA Special publication, 49)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Ensaio de compactação - NBR 7182. Rio de Janeiro, Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 1986. 10p.

AUBERTIN, G.M. & KARDOS, L.T. Root growth through porous media under controlled conditions: I. Effect of pore size and rigidity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 29:290-293, 1965.

BARBER, R.G.; HERRERA, C. & DIAZ, O. Compaction status and compaction susceptibility of alluvial soil in Santa Cruz, Bolívia. Soil Till. Res., 15:153-167, 1989.

BARZEGAR, A.R. & ASSODAR, M. A. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. Soil Till. Res., 57:167-172, 2000.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. Soil physics. 4. ed. New York, John Wiley, 1972. 529p.

BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A.P. & TAYLOR, J.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 5:145-149, 1981.

BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth responses: a review of experimental techniques and root growth responses. J. Soil Sci., 41:341-358, 1990.

BODMAN, G.B. & CONSTANTIN, G.K. Influence of particle size distribution in soil compaction. Hilgardia, 36:567-591, 1965.

BOELS, D.; DAVIES, D.B. & JOHNSTON, A.E. Soil degradation. Rotterdam, Balkema, 1982. 180p.

BOONE, F.R. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. Soil Till. Res., 11:283-324, 1988.

BORGES, A.L.; KIEHL, J. C. & SOUZA, L.S. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo álico após cultivo com fruteiras perenes e mandioca. R. Bras. Ci. Solo, 23:1019-1025, 1999.

BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B. & BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. R. Ceres, 35:553-568, 1988.

BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.E. & BORGES, E.V.S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho Escuro textura média. Pesq. Agropec. Bras., 34:1663-1667, 1999.

BOUMA, J. Guide to the study of water movement in soil pedons above the water table. Madison, University of Wisconsin, 1973. 194p.

CAMARGO, O.A. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas, Fundação Cargill, 1983. 44p.

CASSEL, D.K. & NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTTE, A., ed. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of Agronomy, 1986. p.901-926.

CASTRO, O.M. Comportamento físico e químico de um Latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (*Zea mays* L.). Piracicaba, USP/ESLAQ, 1995. 174p. (Tese de Doutorado)

CHANCELLOR, W.J. Compaction of soil by agricultural equipment. Davis, University of California, 1976. 53p. (Bulletin, 18)

COLETI, J.T. & DEMATTE, J.L. Compactação artificial em solos. Experiências e dados. Inf. Álcool Açúcar, 2:34-38, 1983.

CORRÊA, J.B.D.; ANDRADE, L.A.; DIAS JUNIOR, M.S. & ALVES, V.G. Influência da compactação na concentração de nutrientes da parte aérea da cana-de-açúcar em três tipos de solos. R. STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos, 19: 34-37, 2001.

CRESSWELL, H.P. & KIRKEGAARD, J.A. Subsoil amelioration by plant roots - The process and the evidence. Aust. J. Soil Res., 33: 221-239, 1995.

CRESSWELL, H.P. & PAYDAR, Z. Water retention in Australian soils. I. Description and prediction using parametric functions. Aust. J. Soil Res., 34:195-212, 1996.

DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Metodologia. 2.ed. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 1997. 26p. (Boletim de extensão, 29)

DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S. & ESTANISLAU, W.T. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 23:45-51, 1999.

DÍAZ-ZORITA, M. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. Soil Till. Res., 54:11-19, 2000.

EAGLEMAN, J.R. & JAMIESON, V.C. Soil layering and compaction effects on unsaturated moisture movement. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26:519-522, 1962.

EKWUE, E.I. & STONE, R.J. Density-moisture relations of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. Trans. ASAE, 40:317-323, 1997.

FERNANDES, R.B.A. Atributos mineralógicos, cor, adsorção e dessorção de fosfatos em Latossolos do sudeste brasileiro. Viçosa, UFV, 2000. 265p. (Tese de Doutorado)

FERREIRA, M.M. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos brasileiros. Viçosa, UFV, 1988. 79p. (Tese de Doutorado)

FERREIRA, P.A. Drenagem de terras agrícolas. Viçosa, UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 2002. 211p.

FIGUEIREDO, L.H.A. & DIAS JUNIOR, M.S. Efeito dos sistemas de preparo do solo na $D_{smáx}$ e umidade ótima de compactação em um Latossolo Roxo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26. Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. p.26.

GARCIA, M.C.; BENITO, E. & DIAS, F. Iniciación de estudio de la compactación de los suelos en Galicia, An. Edafol. Agrobiol., 45:1415-1430, 1986.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. R. Bras. Ci. Solo, 28:477-484, 2004.

GERARD, C.J.; SEXTON, P. & SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. Agron. J., 74:875-879, 1982.

GHILDYAL, B.P. & SATYANARAYAMA, T. Effects of soil compaction on the physical properties of four different soils. J. Ind. Soc. Soil Sci., 13:149-155, 1965.

GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. Soil Sci. Soc. Am. J., 32:180-186, 1968.

GROHMANN, F. & QUEIROZ NETO, J.P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. Bragantia, 25:421-431, 1966.

HARRIS, W.L. The soil compaction process. In: BARNES, K.K., ed. Compaction of agricultural soils. Michigan, ASAE, 1971. p.9-44.

HILLEL, D. Introduction to soil physics. New York, Academic Press, 1982. 365p.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWITCZ, A. & VAN OWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.* 35:23-36, 1995.

JAYAWARDANE, N.S. & CHAN, K.Y. The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils - A review. *Aust. J. Soil Sci.*, 32:13-44, 1994.

KAY, B.D. Assessing the suitability of different soils for new cropping systems in terms of rates of change in soil structure. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B. & GUPTA, S.C., eds. *Mechanics and related processes in structured agricultural soils*. Dordrecht, Elsevier, 1989. p.223-232. (NATO Series Applied Sciences)

KAY, B.D.; SILVA, A.P. & BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Can. J. Soil Sci.*, 77:665-667, 1997.

KRZIC, M.; FORTIN, M.C. & BOMKE, A.A. Short-term responses of soil physical properties to corn tillage planting systems in a humid maritime climate. *Soil Till. Res.*, 54:171-178, 2000.

LAL, R. The role of properties in maintaining productivity of soil in the tropics. In: LAL, R. & GREENLAND, D.J., eds. *Soil physical properties and crop production in the tropics*. London, John. Wiley, 1979. p.3-6.

LARSON, W.E. & EYNARD, A. Control and avoidance of soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production: developments in agriculture engineering*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.597-625.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.

LINDEMANN, W.C.; HAM, G.E. & RANDALL, G.W. Soil compaction effect on soybean nodulation, $N_2(C_2H_4)$ fixation and seed yield. *Agron. J.*, 74:307-311, 1982.

MEDEIROS, G.A.; PERINI, M.; LUCARELLI, J.R.F. & DANIEL, L.A. Influência da compactação do solo sobre a condutividade hidráulica saturada para um solo argiloso. *R. Ecosistema*. 26:165-169, 2001.

MEREDITH, H.L. & PATRICK JR., W.H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. *Agron. J.*, 5:163-167, 1961.

MIRANDA, E.E.V. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na Região dos Cerrados. Lavras, UFLA, 2001. 84p. (Dissertação de Mestrado)

MIRANDA, E.E.V. & DIAS JUNIOR, M.S. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). Ci. Agrotec., 24: 337-346, 2000.

MORAES, M.H. Efeito da compactação em algumas propriedades físicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja (*Glycine max* (L) Merrill). Piracicaba, USP/ESALQ, 1988. 106p. (Dissertação de Mestrado)

MOURA FILHO, W. & BUOL, S.W. Studies of Latossol Roxo (Eutrústox) in Brazil. *Experientiae*, 13:201-234, 1972.

O'CONNELL, D.J. The measurement of apparent specific gravity of soils and its relationship to mechanical composition and plant root growth. In: Soil physical conditions and crop Production. London. Min. Agric. Fish Food, 1975. p.298-313. (Technich bulletin, 29)

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESK, D.V.S. & CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob sistemas de uso e manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:291-299, 2003.

ORELLANA, J.A.; PILATTI, M.A. & GRENÓN, D.A. Soil quality: an approach to physical state assessment. *J. Sust. Agric.*, 9:91-108, 1997.

ORLANDO, R.C.; VIEIRA, L.B. & BARBOSA, J.A. Análise de variabilidade do índice de cone para diferentes níveis de teor de água do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas, 1998. *Anais. Lavras, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola*, 1998. p.268-270.

PACHECO, A.A.R.C. & DIAS JUNIOR, M.S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos em adobe. *Ci. Prática*, 14:176-190, 1990.

PEDROTTI, A. & DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: como evitá-la. *Agrop. Catarinense*, 9:50-52, 1996.

PERES, M. & DIAZ, V. Resistencias del suelo y susceptibilidad a la compactación en terrenos de monte sometidos a pastoreo. *An. Edafol. Agrobiol.*, 42:377-386, 1989.

PIDGEON, J.D. & SOANE, B.D. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley mono culture system. *J. Agric. Sci.*, 88:431-442, 1977.

PRIMAVESI, O. Produção de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em função da porosidade de aeração de solos. Piracicaba. USP/ESALQ, 1986. 51p. (Tese de Doutorado)

PROCTOR, R.R. Fundamental principles of soil compaction, *Eng. News Rec.*, 5:286-289, 1933.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S. & MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:929-938, 2000.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.

RENEDO, V.S.G. Dinámica y mecánica de suelos. Madrid, Ediciones Agrotécnicas, 1996. 426p.

RESENDE, J.O. Compactação e adensamento do solo: metodologias para avaliação e práticas agrícolas recomendadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DE SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Palestras. Rio de Janeiro, SBCS/EMBRAPA, 1997. 22p. CD-ROOM.

RICHARD, G.; COUSINB, I.; SILLONA, J. F.; BRUANDB, A. & GUÉRIFA, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.*, 52:49-58, 2001.

RICHARDS, L.A. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.*, 68:95-112, 1949.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M. & CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:821-828, 1999.

RUIZ, H.A. Aulas teóricas de física do solo. Viçosa, UFV., 2003. 47p. (Notas de Aula)

RUIZ, H.A. Métodos de análises físicas do solo. Viçosa, UFV., 2004. 22p. (Notas de Aula)

RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *R. Bras. Ci. Solo*, 29:297- 300, 2005.

RUIZ, H.A.; FERREIRA, G.B. & PEREIRA, J.B.M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. R. Bras. Ci. Solo, 27:389-393, 2003.

SAINI, G.R. & CHOW, T.L. Compactibility indexes of some agricultural soils of New Brunswick, Canada. Soil Sci., 137:33-38, 1984.

SILVA, A.P. Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum*, L.). Piracicaba, USP/ESALQ, 1984. 75p. (Dissertação de Mestrado)

SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1781, 1994.

SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. Plant Soil, 184:323-329, 1996.

SILVA, A.P. & KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J., 61:884-888, 1997a.

SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. Soil Sci. Soc. Am. J., 61:877-883, 1997b.

SILVA, R.B. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. R. Bras. Ci. Solo, 23:219- 226, 1999.

SOANE, B.D. The effects of traffic and implements on soil compaction. J. Prof. Int. Agric. Eng., 25:115-126, 1970.

SOANE, B.D. Traction and transport system as related to cropping systems. Penicuik, Scotch Institute of Agriculture, 1971. 73p.

SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, S.W. & POINTER, D.J. Compaction by agricultural wheel: review. I. Soil and wheel characteristics. Soil Till. Res., 1:207-237, 1981.

STIRZAKER, R.J. Processing tomato response to soil compaction and fumigation. Aust. J. Exp. Agric., 37:477-483, 1997.

STOLSY, L.H. & BARLEY, K.P. Mechanical resistance encountered by roots entering compact soils. Soil Sci., 105:297-301, 1968.

STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:395-401, 2001.

TAMARI, S. Relations between pore-space and hydraulic properties in compacted beds of silty-loam aggregates. *Soil Technol.*, 7:57-73, 1994.

TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H. & ITZA, C.A. Field compaction at different soil water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. *Soil Till. Res.*, 76:95-103, 2004.

TAYLOR, H.M. & BURNETT, E. Influence of soil strength on root growth habits of plants. *Soil Sci.*, 98:174-180, 1964.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER JUNIOR, J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.

TAYLOR, S.A. & ASCROFT, G.L. *Physical edaphology. The physics of irrigated and non irrigated soils.* San Francisco, W.H. Freeman, 1972. 533p.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C. & CULLEY, J.L.B. Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. Ottawa, Soil Quality Evaluation Program, 1994. 36p. (Technical Report, 2).

TORMENA, C.A. Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo. Piracicaba, USP/ESALQ, 1998. 106p. (Tese de Doutorado)

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GALERANI, P.R. Manejo do solo para cultura da soja. Londrina, EMBRAPA-CNPSo, 1993. 71 p.

VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON. Soil density and root penetration. *Soil Sci.*, 65:487-493, 1948.

VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo que afetam a produtividade agrícola. In: Instituto Agropecuário Paraná - IAPAR. Manual agropecuário para o Paraná. Volume 2. Londrina, IAPAR, 1978. p.37-44.

VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. *Trans. ASAE.*, 4:242-246, 1961.

WATSON JUNIOR, J.R.; MUSSER, H.B. & JEFFRIES, C.D. Soil compaction determination with a soil penetrometer as compared with the geiger counter X-ray spectrometer. *Agron. J.*, 43:255-258, 1951.

WEAVER, H.A. & JAMIESON, V.C. Effects of moisture on tractor tire compaction of soil. *Soil Sci.*, 71:15-23, 1951.

XU, X.; NIEBER, J.L. & GUPTA, S.C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1743-1750, 1992.

APÉNDICE

Quadro 1A – Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado (K_0), da macroporosidade (P_M) e da microporosidade (P_m), considerando o solo e o índice de compactação (IC)

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		
		K_0	P_M	P_m
LV vs. LVA	1	0,9418**	0,001884**	0,013122**
IC d/LV	3	154,92**	0,026232**	0,000175**
IC d/LVA	3	161,95**	0,025287**	0,000767**
Resíduo	24	0,0800	0,00000569	0,00000569
CV (%)		3,74	1,75	0,60

** : significativo a 1 % pelo teste F.

Quadro 2A – Análise de variância da resistência à penetração a 1,5 cm de profundidade (RP1,5) e da resistência máxima à penetração (RMP), considerando o solo, o seu potencial de água e o índice de compactação (IC)

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	
		RP1,5	RMP
LV vs. LVA	1	2,7816**	3,5808**
Potencial e IC d/LV	19	3,9850**	4,6168**
Potencial e IC d/LVA	19	1,1756**	1,3653**
Resíduo	80	0,2318	0,2821
CV (%)		56,35	51,27

** : significativo a 1 % pelo teste F.