

MODELOS FÍSICOS PARA CONVERSÃO DE UNIDADES DE PENETRÔMETROS DE IMPACTO UTILIZADOS NO DIAGNÓSTICO DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS

Mário Renan de Oliveira Romão¹; Luiz Alberto Ribeiro Mendonça¹; Antonio Carlos Alonge Ramos¹; José Valmir Feitosa¹; Adriana Oliveira Araújo²; Sanne Anderson de Moura Araújo¹ & Antonio Alisson Fernandes Simplício¹

Resumo - Um dos atributos físicos do solo que melhor retrata a compactação é a resistência mecânica à penetração (RP). Neste trabalho foram estudados os modelos físicos dos Holandeses e de Sanders primitivo e modificado por Stolf, utilizados na conversão das RPs para caracterizar os solos quanto a compactação. As medidas foram realizadas em áreas preservadas e antropizadas na Chapada do Araripe. O modelo dos Holandeses considera o choque do bloco de massa com o suporte do penetrômetro como sendo inelástico. O modelo de Sanders aplica a conservação da energia somente ao bloco, sem levar em conta o deslocamento do conjunto. Enquanto o modificado por Stolf aplica a conservação da energia ao bloco e ao conjunto. Os modelos de Sanders primitivo e modificado por Stolf superestimaram as RPs calculadas, quando comparados com o modelo padrão dos Holandeses. Para um erro admissível de 5%, somente o modelo de Sanders primitivo apresentou valores aceitáveis para a área de estudo. As menores RPs foram encontradas nos solos de vegetação preservada e as maiores nos das áreas antropizadas. Os valores encontram-se na faixa de resistência moderada a muito alta, podendo restringir o crescimento radicular da vegetação e reduzir a capacidade de infiltração.

Abstract - One of the soil physical attributes that best depicts the compression is the penetration resistance (PR). In this study physical models of the Holandeses and Sanders primitive and modified by Stolf, used in the conversion of RPs to characterize the soil as compaction. Measurements were performed in preserved and anthropized areas at the Araripe Plateau. The model of the Holandeses considers the impact of the mass with the support of the penetrometer as inelastic. Sanders's model applies only to energy conservation the block without considering the displacement of set. While the modified Stolf applies energy conservation to the block and the set.

¹ Universidade Federal do Ceará, Campus do Cariri, Av. Tenente Raimundo Rocha s/n, Bairro Universitário, CEP 63000-000, Juazeiro o Norte – CE; Fone: (88) 3572 7223; e-mail: mariorenanbr@hotmail.com; larm@ufc.br.

² Faculdade de Tecnologia Centec – Cariri, Av. Amália Xavier de Oliveira s/n, Bairro Triangulo, CEP 63040-000, Juazeiro do Norte – CE; Fone: (88) 3566 4051; e-mail: adrianasaneamento@yahoo.com.br.

Sanders primitive models and modified by Stolf overestimate the calculated RPs, compared with the standard model of the Holandeses. For an admissible error of 5%, only the primitive model of Sanders showed acceptable values for the study area. The lower RPs was found in the soil of preserved vegetation and the highest in the anthropized areas. The values are in the range of moderate to very high resistance, which can restrict root growth and reduce the infiltration capacity.

Palavras-chave - resistência do solo à penetração, manejo florestal, recarga de aquíferos

1 - INTRODUÇÃO

A resistência mecânica do solo é considerada um parâmetro importante no dimensionamento de fundações rasas de pequenas obras, na avaliação da base de pavimentos, na determinação da qualidade física do solo, na avaliação das condições do crescimento de raízes de vegetais, no entendimento da dinâmica do fluxo de água no solo, entre outros.

Um dos atributos físicos do solo que melhor retrata a compactação é a resistência mecânica à penetração (RP) (Imhoff et al., 2000; Stone et al., 2002), por apresentar relação direta com a densidade e com o crescimento das plantas (Hoad et al., 2001; Silva, 2003).

Num dado perfil a RP identifica as camadas compactadas. Esta medida descreve a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como por exemplo, uma raiz em crescimento ou a água percolando (Pedrotti et al., 2001).

Segundo Bertol et al. (2001), áreas de solos compactados possuem baixas capacidades de infiltração e, conseqüentemente, maior escoamento superficial e erosão.

A RP é determinada com o uso de penetrômetros. Dentre os penetrômetros mais utilizados encontram-se os estáticos (que registram a RP por unidade de área), os dinâmicos ou de impacto (que registram a RP por unidade de profundidade) e os estáticos eletrônicos (que registram a RP por valores de resistência elétrica do solo).

Os penetrômetros de impacto têm sido amplamente utilizados no campo para caracterização de solos compactados pelo uso e manejo. Neste tipo de penetrômetro a penetração por impacto é lida em uma haste graduada e os resultados são fornecidos em impactos/dm (número de impactos necessários para perfurar um decímetro de solo). Porém, para melhor aproveitamento dos dados obtidos, é necessária a conversão dos mesmos em grandezas físicas que represente a resistência mecânica dos solos, como por exemplo, em MPa (Stolf, 1991).

Neste contexto, o modelo de Sanders foi o primeiro a ser utilizado, seguido pelo dos holandeses e pelo de Brix (Stolf, 1991). O modelo de Sanders consiste na aplicação da conservação da energia somente à massa que se choca com o suporte do penetrômetro, sem levar em conta o

deslocamento do conjunto; o dos holandeses considera o choque da massa com o suporte do penetrômetro como sendo inelástico; e o de Brix como inelástico, mas evitando que a massa prossiga junto ao penetrômetro após o choque.

O modelo dos holandeses é o mais aceito atualmente por apresentar independência em relação à geometria do aparelho e por calcular valores médios de resistência do solo próximos ao do penetrômetro convencional de mola (Stolf, 1991).

Segundo Tormena e Roloff (1996) e Costa e Nishiyama (2007), as principais vantagens do penetrômetro de impacto são: o baixo custo; a não necessidade de calibração frequente; a obtenção de resultados independente do operador; a leveza do equipamento, reunido num conjunto de cerca de 7,5 kg; a aplicabilidade a todas as situações indicadas aos penetrômetros estáticos manuais; a possibilidade da utilização em solos de alta resistência; a praticidade por dispensar o dinamômetro e o registrador; e a rapidez na execução dos ensaios em campo.

Este trabalho objetivou estudar os modelos físicos dos Holandeses e de Sanders primitivo e modificado por Stolf, utilizados na conversão das RPs para caracterizar, quanto a compactação, solos de áreas de recarga manejadas e preservadas na Chapada do Araripe. Este estudo abordou os fundamentos físicos dos modelos e o estudo estatístico dos resultados.

2 - METODOLOGIA

2.1 - Determinação da Resistência à Penetração do Solo

Para as medidas de resistência à penetração do solo (RP), foi utilizado o penetrômetro de impacto modelo Stolf et al. (1983) (Figura 1).

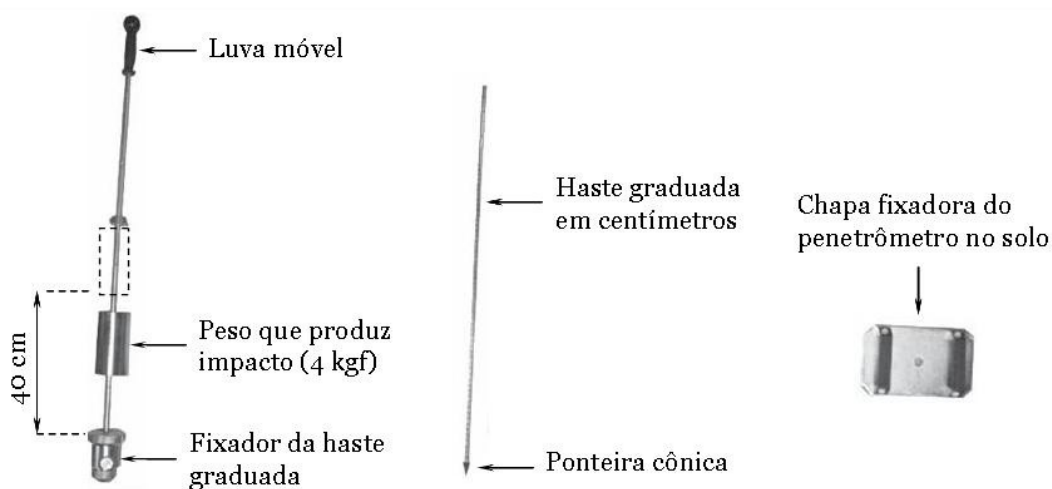


Figura 1. Penetrômetro de Impacto Modelo Stolf

Neste tipo de penetrômetro um peso de 4 kgf é liberado de uma altura de 40 cm e ao chocar-se com o fixador da haste graduada o sistema, através da ponteira cônica, penetra no solo a uma profundidade x do estado inicial.

A penetração por impacto é lida na haste graduada do penetrômetro e os resultados são fornecidos em impactos/dm (número de impactos necessários para perfurar um decímetro de solo).

As especificações do penetrômetro utilizado são: massa que produz o impacto (M): 4 kg; massa do sistema sem considerar M (m): 3.5 kg; altura de queda de M (h): 40 cm; diâmetro máximo da seção transversal da ponteira cônica (d): 1,1 cm.

As RPs foram determinadas em solos de uma unidade de manejo florestal e de floresta preservada na Chapada do Araripe, totalizando 21 pontos ensaiados.

As RPs em cada ponto foram obtidas a cada 5 cm de profundidade, num perfil de 60 cm, totalizando 252 medidas.

2.2 - Modelos Utilizados

2.2.1 - Holandeses

O modelo dos holandeses considera um choque inelástico entre o bloco de massa M e o fixador da haste graduada. Neste caso não ocorrerá conservação de energia mecânica após o choque, pois acontecerão perdas, principalmente na forma de calor e sonora (Stolf, 1991).

Da conservação da energia mecânica eles obtiveram a velocidade do bloco imediatamente antes do choque com o suporte:

$$v_0 = \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade.

Da conservação do momento linear, eles obtiveram a velocidade do sistema imediatamente após o choque:

$$v_f = \frac{M\sqrt{2gh}}{(M+m)}. \quad (2)$$

Através da lei de conservação da energia, eles deduziram o trabalho realizado pela ponteira cônica sobre o solo para deformá-lo a uma profundidade x :

$$Fx = fMgh + (M+m)gx, \quad (3)$$

onde F é a força de resistência do solo; $f = M/(M+m)$ é o fator de perda de energia, dado pela razão entre as energias cinéticas imediatamente após e imediatamente antes do choque; Mgh é a energia potencial gravitacional do bloco; e $(M+m)gx$ é a energia potencial gravitacional do

sistema. Neste cálculo, foram desprezadas as energias sonora e térmica durante o processo de colisão, que são consideradas muito pequenas em relação à energia de deformação.

Como a força de resistência do solo é dada pela resistência à penetração (RP) aplicada à área da seção transversal da ponteira cônica, então

$$RP = \frac{4g}{\pi d^2} \left[m + M \left(1 + \frac{Mh}{M+m} \frac{1}{x} \right) \right]. \quad (4)$$

2.2.2 - Sanders Primitivo

Neste modelo, Sanders usou o princípio da conservação de energia sobre o bloco de massa M que produz o impacto. Neste caso, a variação da energia potencial gravitacional do bloco é transformada em energias de deformação do solo, sonora e térmica. Contudo, as energias sonora e térmica, são desprezadas, pois são consideradas muito pequenas em relação à energia de deformação. Assim, a variação da energia potencial gravitacional do bloco de massa M, que produz o impacto, é aproximadamente igual à energia de deformação do solo a uma profundidade x . Portanto, o trabalho realizado pela ponteira cônica para deformar o solo a uma profundidade x é dado por

$$Fx = Mgh. \quad (5)$$

Então a resistência à penetração aplicada à área da seção transversal da ponteira cônica é dada por

$$RP = \frac{4Mgh}{\pi d^2} \frac{1}{x}. \quad (6)$$

2.2.3 - Sanders Modificado por Stolf

Stolf aplicou o mesmo princípio de conservação de energia usado por Sanders, tanto ao bloco de massa M que produz o impacto, como ao sistema. Neste modelo a variação da energia potencial do sistema também contribui para a deformação do solo. Assim o trabalho realizado pela ponteira cônica sobre o solo para deformá-lo a uma profundidade x é dado por

$$Fx = Mgh + (M + m)gx, \quad (7)$$

que expressa a soma das variações de energia potencial devido à queda da massa M e devido ao deslocamento do sistema (Stolf, 1991).

Da Equação 7 obtém-se que

$$RP = \frac{4g}{\pi d^2} \left[m + M \left(1 + h \frac{1}{x} \right) \right]. \quad (8)$$

2.3 - Análise Estatística:

Utilizou-se teste de correlação linear para entender a relação existente entre os modelos estudados, tomando como padrão o modelo dos Holandeses que é mais aceito na comunidade acadêmica.

Avaliaram-se também os erros existentes entre cada valor estimado pelos modelos de Sanders primitivo e modificado e o correspondente valor estimado pelo modelo padrão dos Holandeses.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta análise o modelo dos Holandeses foi considerado padrão, por apresentar, segundo Stolf (1991), independência em relação à geometria do penetrômetro e por calcular valores médios de RPs próximos aos fornecidos pelo penetrômetro convencional de mola.

Considerando uma situação hipotética extrema, onde o solo não apresentaria resistência alguma à penetração, teoricamente o mesmo seria deformado a uma profundidade x infinita. Neste caso, das equações 4, 6 e 8 obtêm-se resistências mínimas extremas de respectivamente 0,77, 0,00 e 0,77 MPa, para os modelos dos Holandeses e de Sanders primitivo e modificado. Na prática estas resistências nunca serão atingidas. O limite mínimo de 0,77 MPa para o modelo dos Holandeses foi utilizado na limitação das retas de correlações da Figura 2. Nesta condição, o prolongamento das retas abaixo deste limite não teria sentido físico.

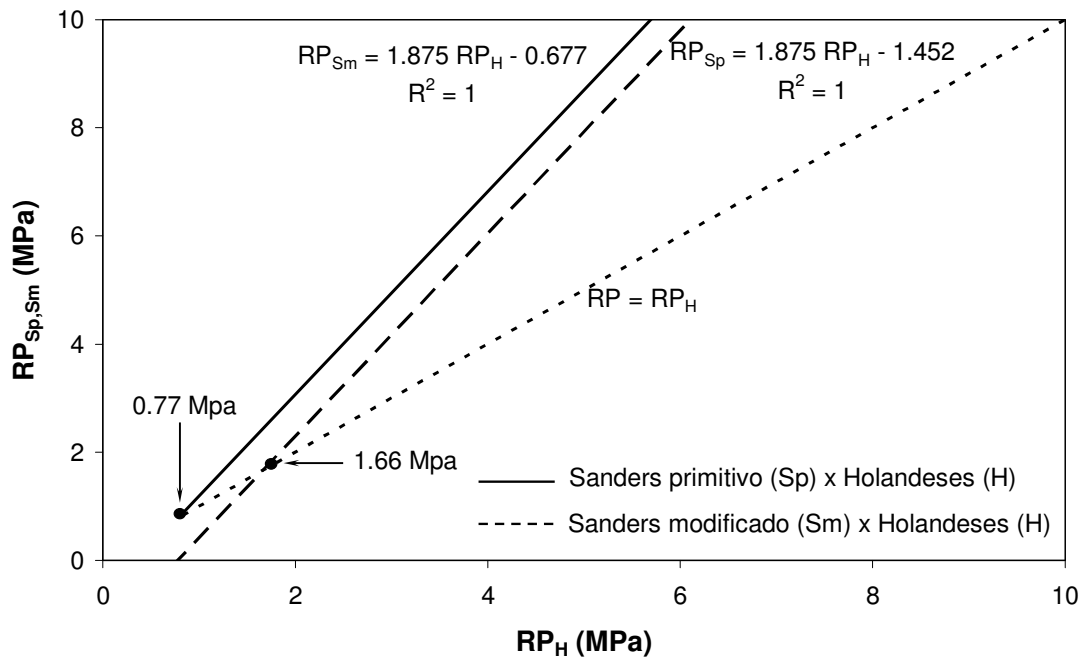


Figura 2. Regressão Linear Entre a Resistência à Penetração Calculada pelo Modelo dos Holandeses e Pelos Modelos de Sanders Primitivo e Modificado por Stolf

A Figura 2 mostra que os modelos de correlação linear entre os valores de RPs calculados pelo modelo dos Holandeses e pelos de Sanders primitivo e modificado, foram explicados com 100% de ajuste.

Verifica-se que os modelos de Sanders modificado e primitivo superestimam os resultados das RPs para valores acima de respectivamente 0,77 e 1,66 MPa. Já o modelo de Sanders primitivo subestima os resultados para RPs inferiores a 1,66 MPa.

Para solos relativamente compactados, representados por RPs acima destes valores limites, os modelos de Sanders primitivo e modificado consideram parcelas importantes de energia que são dissipadas durante o choque entre a massa impactante e o fixador da haste graduada, representadas pelo fator de perda de energia da equação 3.

O modelo de Sanders primitivo, para valores de RPs abaixo do valor limite de 1,66 MPa, ao desprezar a variação da energia potencial do sistema, que contribui de forma significativa para a deformação de solos de baixa compactação relativa, subestima as RPs calculadas.

A Figura 3 mostra as curvas penetração por impacto versus RPs obtidas pelos modelos dos Holandeses e de Sanders primitivo e modificado. A interseção entre as curvas dos Holandeses e de Sanders primitivo indica a RP de 1,66 MPa, correspondente a penetração da ponteira cônica a uma profundidade de 0,1 m após um impacto. Também se observa os valores das RPs superestimados pelo modelo de Sanders modificado.

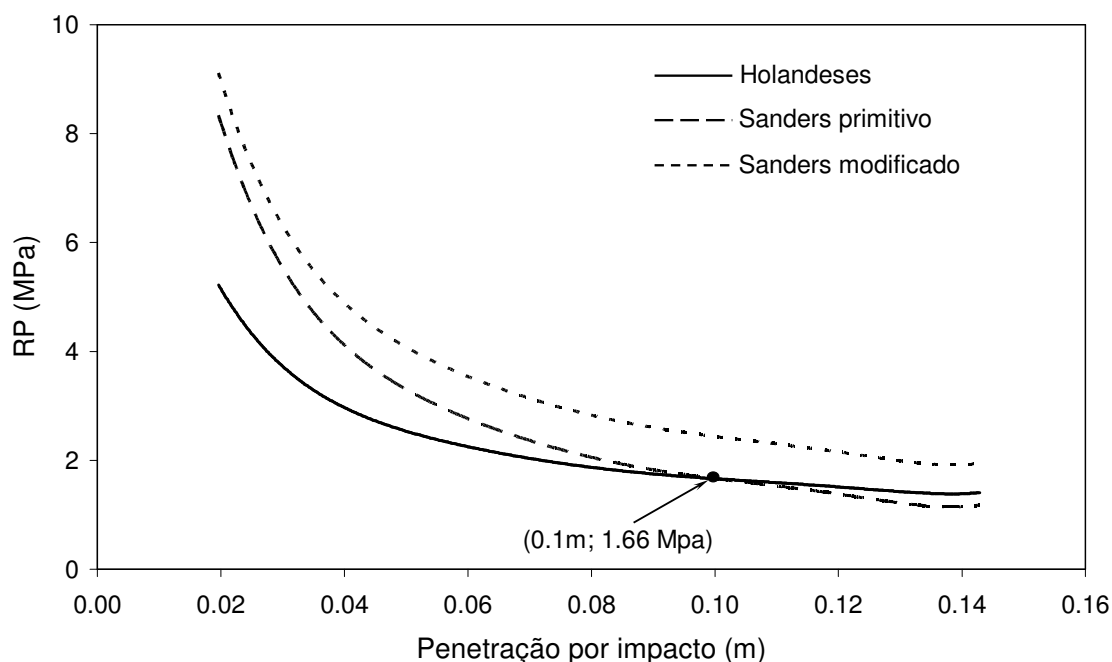


Figura 3. Penetração por Impacto Versus Resistência à Penetração Obtidas pelos Modelos dos Holandeses e de Sanders Primitivo e Modificado

Para o modelo dos Holandeses observa-se valor mínimo calculado de 1,39 MPa e máximo de 5,27 MPa. Os valores mínimos e máximos calculados pelo modelo de Sanders primitivo foram de respectivamente 1,16 e 8,42 MPa e pelo de Sanders modificado, de 1,93 e 9,20 MPa. Os menores valores encontram-se nas áreas de vegetação preservada e os maiores nas antropizadas.

Considerando um erro aceitável máximo de 5% entre cada valor calculado por um dos modelos de Sanders e o correspondente calculado pelo modelo padrão dos Holandeses, verifica-se valores aceitáveis na faixa de 0,09 (1,8 MPa) a 0,11m de penetração por impacto (1,6 MPa), correspondente apenas a aproximadamente 9% dos 252 valores calculados (Figura 4).

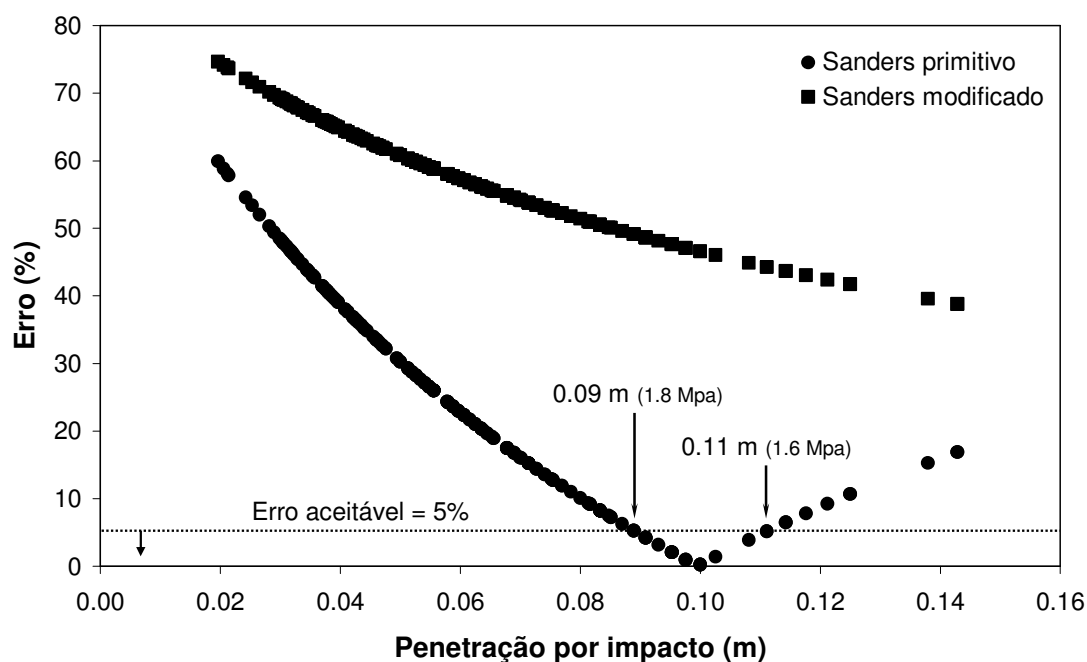


Figura 4. Erro Versus Penetração por Impacto Obtidos pelos Modelos dos Holandeses e de Sanders Primitivo e Modificado

Considerando os resultados obtidos pelo modelo dos Holandeses, segundo a classificação de Arshad et al. (1996), os valores calculados encontram-se na faixa de resistência moderada (1,0 – 2,0 MPa) a muito alta (4,0 – 8,0 MPa). Como a resistência do solo à penetração aumenta com a compactação do mesmo, ela pode ser restritiva ao crescimento radicular se apresentar valores acima de 3,0 MPa (Grant e Lafond, 1993) e aproximadamente 21% dos valores calculados encontram-se nesta condição.

Segundo Tisdall e Oades (1982) e Araújo et al. (2009) este aspecto está relacionado com a permanência da continuidade dos poros, resultante da decomposição das raízes e da atividade biológica edáfica mais efetiva, propiciando maior estabilidade dos agregados e maior capacidade de infiltração.

Uma interpretação mais detalhada destas RPs encontra-se no artigo “Avaliação da Resistência à Penetração de Solos Submetidos a Manejo Florestal de Vegetação Nativa na Chapada do Araripe”, apresentado a este congresso.

4 - CONCLUSÃO

Os modelos de Sanders primitivo e modificado por Stolf, que utilizam o princípio da conservação da energia mecânica, superestimam valores das resistências à penetração dos solos (RPs), quando comparados com o modelo padrão dos Holandeses, que considera o choque inelástico.

Considerando um erro admissível de 5%, somente o modelo de Sanders primitivo apresentou valores aceitáveis para a área de estudo em apenas 9% dos 252 valores calculados.

Os menores valores de RPs encontram-se em solos de áreas de vegetação preservada e os maiores em solos de parte das áreas manejadas.

Os valores calculados encontram-se na faixa de resistência moderada a muito alta. Aproximadamente 21% dos perfis analisados apresentaram resistência muito alta, podendo ser restritivo ao crescimento radicular da vegetação, além de poder contribuir com redução da capacidade de infiltração.

Neste contexto, planos de manejos desenvolvidos em áreas de recarga, principalmente em regiões semi-áridas, devem ser considerados unidades de gerenciamento. Neles devem ser desenvolvidas metodologias que contemplem monitoramento e pesquisas contínuas sobre a dinâmica da integridade física dos solos e a RP é um parâmetro importante para este fim.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (Cogerh), ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (Ibama) – Crato, à Área de Proteção Ambiental (APA) – Chapada do Araripe, aos proprietários e gestores da Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Pau D’arco e ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFC, pelo apoio logístico; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) e ao Governo do Estado do Ceará, pelo suporte financeiro.

5 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. O.; MENDONÇA, L. A. R.; FRANCA, R. M.; FEITOSA, J. V.; ARAÚJO, S. A. de M.; SIMPLÍCIO, A. A. F.; KERNTOPF, M. R.; FIGUEIREDO, J. V. de; OLIVEIRA, J. F. de. Avaliação da densidade da macrofauna edáfica como indicador da degradação de solos submetidos

a manejo florestal de vegetação nativa na Chapada do Araripe. In: I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2009.

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, p. 123-141, 1996 (SSSA Special publication 49).

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 55-560, 2001.

COSTA, F.P.M.; NISHIYAMA, L. Caminhos da Geografia. **Revista on line.** <http://www.igufu.br/revista/caminhos.html>. ISSN 1678- 6343. Uberlândia, v. 8, n. 24, p. 131-143, 2007.

GRANT, C.A.; LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. **Journal of Soil Science**, v. 73, p. 223-232, 1993.

HOAD, S.P.; RUSSEL, G.; LUCAS, M.E.; BINGHAM, I.J. The management of wheat, barley, and oat root systems. **Advances in Agronomy**, v. 74, p. 195-254, 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v 35, p.1493-1500, 2000.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M.M.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GOMES, A.S. e TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 521-529, 2001.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, p. 171, 2003.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.2, p.229-35, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. **Recomendações para uso de penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar- Stolf.** São Paulo, MIC/IAA/PNMC - Planasulcar, p. 8, 1983. (Série Penetrômetro de Impacto, BT1).

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Comparação do solo na cultura do feijoeiro – I: Efeitos nas propriedades físicas - hídricas do solo. **Revista Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p. 207-212, 2002.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 333-339, 1996.