



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**CURSO DE AGRONOMIA**

**ISMAEL COELHO MAIA**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO**  
**COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELO TRAFEGO DE MAQUINAS**  
**AGRICOLAS**

**FORTALEZA – CE**

**2016**

ISMAEL COELHO MAIA

COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELO TRAFEGO DE MAQUINAS  
AGRICOLAS:

Relatório de Estágio Supervisionado  
Apresentado ao Curso de Agronomia no  
Departamento de Engenharia Agrícola da  
Universidade Federal do Ceará, como parte  
dos requisitos para obtenção do Título de  
Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro

FORTALEZA – CE

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M186r Maia, Ismael Coelho.  
Relatório de estágio supervisionado compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas agrícolas /  
Ismael Coelho Maia. – 2016.  
71 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências  
Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2016.  
Orientação: Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro.

1. Tráfego de máquinas. 2. Manejo do solo. 3. Propriedades física do solo. I. Título.

CDD 630

---



ISMAEL COELHO MAIA

COMPACTAÇÃO DO SOLO CAUSADA PELO TRAFEGO DE MAQUINAS  
AGRICOLAS:

Relatório de Estágio Supervisionado  
Apresentado ao Curso de Agronomia do  
Departamento de Engenharia Agrícola da  
Universidade Federal do Ceará, como  
parte dos requisitos para obtenção do  
Título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em 11/07/2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Carlos Alessandro Chioderoli  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, por vencer mais essa batalha.

A meus pais, pela educação e confiança.

A todos que acreditaram em mim,

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me dar forças para superar todas as adversidades, que não foram poucas, durante todo o tempo de minha graduação e nunca me deixar desistir.

Aos meus pais, Sr. Osiel e D. Conceição, por sempre me apoiarem, acreditarem no meu potencial e aceitarem minhas ausências para atividades acadêmicas.

Ao Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro pelas orientações firmes e seguras, além do apoio, amizade, dedicação e paciência.

Ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, por me oferecer, o melhor curso que eu poderia escolher na minha vida e me orgulhar de ser um Engenheiro Agrônomo.

A Rafael Fernandes, que me ajudou arduamente no meu experimento, de baixo de sol e chuva.

A Walisson Silveira, pela ajuda em elaborar meu relatório de estágio, dando idéias e mostrando um melhor caminho para as pesquisas.

Aos amigos André Lemos, Glauber Demôntier, Márcia Batista, Rafael Jatahy, Rins Medeiros, obrigado pela parceria e que amizades deles sejam lembradas para sempre; e todos os amigos que ingressaram no curso de Agronomia comigo.

A todos, que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação pessoal e profissional ao longo desse tempo.

***Meu muito Obrigado!***

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes.”

**(Martin Luther King)**





## RESUMO

Os solos agrícolas vêm sofrendo grandes mudanças, sendo a compactação apontada como a principal causa destas mudanças em virtude do tráfego de tratores e máquinas agrícolas em condições inadequadas de manejo. A presente revisão teve como objetivo discutir as causas e os efeitos da compactação sobre as propriedades físicas do solo, considerando as práticas de manejo. A extensão e a intensidade da compactação do solo vão depender da pressão exercida pelos pontos de apoio das máquinas e equipamentos, das suas cargas, do número de vezes que trafegam no terreno, da textura e da agregação do solo. As modificações que podem ocorrer nas propriedades físicas do solo vão desde aumento na densidade do solo, aumento da resistência do solo à penetração das raízes, redução da macroporosidade, conseqüentemente, menor condutividade e menor acúmulo de água, comprometendo desta forma a infiltração de água e a penetração das raízes no perfil do solo, que se torna mais suscetível à erosão. Com a adoção de algumas técnicas de manejo por parte dos agricultores poderão ser minimizados os efeitos da compactação do solo sobre suas propriedades físicas, melhorando assim o ambiente para desenvolvimento do sistema de raízes das culturas.

Logo no estágio foram analisadas a compactação causada pela inflação inadequada nos pneus e o tráfego na área estudada, onde a área estudada estava sendo utilizada para aulas da disciplina de máquinas agrícolas.

**Palavras-chave:** Tráfego de máquinas, manejo do solo, propriedades físicas, resistência à penetração.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeitos da pressão e tensão nas funções do poro-----	24
Figura 2 – Aparelho utilizado para fazer as medições nos níveis de compactação das camadas subsuperficiais. -----	29
Figura 3 - Efeito do tráfego agrícola em Nitossolo Vermelho distroférico sob condição de alto teor de água no solo.-----	38
Figura 4 – Variação da umidade ( $\theta$ ) e da densidade do solo, -----	39
Figura 5 - Umidade volumétrica do solo -----	40
Figura 6 – Área experimental do Laboratório de investigação de acidentes com maquinas agrícolas (LIMA), onde foi realizado o experimento -----	16
Figura 7 –Equipamentos do laboratorio de investigação veicular (NUTEC) -----	55
Figura 8 – Penetrometro utilizado na área do experimento para realizar as medições dos níveis de compactação. -----	56
Figura 9 – Abertura cavada no solo com a profundidade de 30 cm, para a coleta de amostra. -----	57
Figura 10 – Recipiente onde foi armazenada a amostra de solo de cada parcela. --	58
Figura 11 – Balança de precisão onde foram pesadas todas as amostras de coleta de solo -----	58
Figura 12 – Estufa de secagem de solo, onde foram colocadas para secar as amostras de solo a temperatura de 105°C, para a obtenção da umidade. -----	58
Figura 13 – Area da parcela de rastro do trator onde foi realizada a coleta de dados com o penetrometro. -----	59

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO -----	14
2 – DESCRIÇÃO GERAL -----	16
3 - REVISÃO DE LITERATURA -----	17
3.1 – Compactação do solo -----	17
3.2 - Causas da compactação-----	19
3.3 - Profundidade de compactação-----	21
3.4 - Compactação e relação com as propriedades físicas e mecânicas do solo-----	23
3.4.1 - Estabilidade dos agregados do solo -----	26
3.4.2 - Macroporosidade do solo-----	28
3.4.3 - Resistência do solo à penetração -----	29
3.4.4 – Densidade e porosidade do solo-----	35
3.4.5 – Teor de água no solo -----	37
3.4.6 – Intervalo hídrico ótimo-----	39
3.4.7 – Grau de compactação -----	41
3.4.8 – Pressão de preconsolidação -----	42
3.5 – Compactação e relação com o crescimento e produtividade de plantas -----	45
3.5.1 – Crescimento radicular -----	45
3.5.2 – Crescimento aéreo e produtividade -----	47
3.6 – Pressão inflação dos rodados no solo -----	48
3.7 – Influência da pressão de inflação do pneu do trator na resistência do solo a penetração ----	49
3.8 – Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo -----	51
3.9 – Tráfego de maquinas e implementos agrícolas no solo -----	52
4 – DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E METODOLOGIAS UTILIZADAS-----	55
4.1– Características dimensionais do Trator (4 hrs) -----	55
4.2– Resistência do solo à penetração (48 hrs)-----	56
4.3– Teor de umidade do solo (128 hrs)-----	57
5 – CONCLUSÃO-----	60
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	61



## 1 - INTRODUÇÃO

O solo é um organismo vivo composto por elementos sólidos, líquidos e gasosos que podem ser de origem mineral e orgânica. É nele que as plantas encontram o ambiente favorável para se sustentarem e retirarem os nutrientes necessários para sua sobrevivência.

Para que isso ocorra de forma satisfatória é importante que a estrutura física do solo esteja adequada aos padrões exigidos pelas culturas agrícolas em que a relação de macro e microporos seja equilibrada, permitindo perfeito armazenamento da água.

Toda e qualquer intervenção realizada no solo pode modificar sua estrutura, alterando e interferindo de forma benéfica ou não a produção agrícola.

Essas interferências podem estar diretamente relacionadas com o tipo de solo e ao tipo de manejo realizado, em que cada solo possui suas características específicas, tornando-o susceptível a essas intervenções.

Algumas práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nas propriedades físicas do solo, as quais podem ser permanentes ou temporárias.

Assim, o interesse em avaliar a qualidade física do solo tem sido incrementado por considerá-lo como um componente fundamental na manutenção e/ou sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola

A densidade do solo tem sua origem pelos processos naturais de formação do solo, formando camadas adensadas em determinadas profundidades no perfil do solo, quando é de forma natural e de forma acelerada causada principalmente pela ação antrópica nas práticas de manejo cultural das áreas utilizadas com culturas anuais, perene e reflorestamentos. As práticas de manejo utilizadas que podem causar compactação são desde a simples queda da árvore no momento do corte até o tráfego de máquinas para colheita de grãos na agricultura e corte e processamento de árvores no reflorestamento.

Este dano ao solo ocasiona a desestruturação dos agregados do solo causando assim a diminuição do espaço poroso do solo, principalmente os macroporos, que são os responsáveis pela aeração, trocas gasosas entre a atmosfera e o solo, crescimento do sistema radicular das plantas, entre outros. Essa diminuição da porcentagem de macroporos, afeta também a adequada infiltração de água para as camadas mais profundas do perfil do solo, resultando no processo erosivo da camada superficial do solo e se este processo não for controlado pode passar para grandes voçorocas na área com perdas significativas de solo e adubos que seriam utilizados pela cultura.

Assim para a estimativa de compactação de um determinado solo, utilizam-se parâmetros estruturais do solo, como a porosidade (principalmente a macroporosidade), densidade e resistência a penetração. Pela avaliação desses parâmetros, realiza-se a quantificação de perdas da qualidade das características físicas do solo, sendo que com esta avaliação pode-se concluir se haverá prejuízo para o adequado desenvolvimento da cultura e tomar as devidas precauções para minimizar a compactação quando ocorrer na área. Além de interferir na adequada estruturação do solo, a compactação influencia nos processos químicos e biológicos do solo, pois para o metabolismo da fauna presente no solo, tem que haver a troca gasosa entre o solo e a atmosfera, desta forma evita-se o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, o qual é prejudicial para o desenvolvimento dos organismos. Quanto aos processos químicos, a compactação afeta no processo de mineralização e disponibilidade de nutrientes, que são realizados por certos microrganismos do solo.

## 2 – DESCRIÇÃO GERAL

As avaliações do estágio foram realizadas na área experimental do Laboratório de investigação de acidentes com máquinas agrícolas (LIMA) e Núcleo integrado de mecanização e projetos agrícolas (NIMPA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (Figura 5), latitude 3°44'S, longitude 38°34'W e altitude de 19,6 m. Segundo a metodologia da EMBRAPA (1999), o solo foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo, de classe textural franco arenoso, com aproximadamente 82,90% de areia, 6,40% de silte e 10,60% de argila.

Figura 6 – Área experimental do Laboratório de investigação de acidentes com máquinas agrícolas (LIMA), onde foi realizado o experimento



Fonte – Elaborada pelo próprio autor



### 3 - REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 – Compactação do solo

Relaciona-se o termo compactação do solo ao processo que descreve a diminuição de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (LIMA, 2004).

Alakukku e Elomen (1994) afirmam que a compactação do solo vem se sobre-saindo em níveis mundiais como sendo um dos fatores limitantes da qualidade física das terras agrícolas, prejudicando a obtenção de maiores índices de produtividade.

A compactação do solo não vem acontecendo de forma natural (SOANE e OUWERKERK, 1994). Essa compactação pode ser manifestada como sendo a modificação da estrutura física do solo, assim diminuindo os espaços internos que, normalmente, são ocupados por água e ar. Com isso a reduz-se a liberdade desses elementos dificultando, assim, o bom desenvolvimento das culturas (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

A Pressão causada pelo tráfego de máquinas e implementos sobre o solo vem causando modificações na densidade do solo, onde essas modificações são difíceis de serem analisadas e ocorrem de forma lenta no solo, como por exemplo, a eluviação de argilas (SECCO et al., 2004).

Para Reichert et al. (2007), a compactação e a consequência da ação antrópica e a concentração é um fenômeno natural. Startsev e McNabb (2001) acrescentaram ainda que a compactação diminuem a infiltração de água, aumentando a erosão e o assoreamento dos mananciais de água.

A principal razão para o aparecimento da compactação do solo são as operações no campo (plantio, tratos culturais e colheita) onde essas são executadas constantemente ao longo dos anos (OLIVEIRA, 2002), pois com a atualização da agricultura, o peso das máquinas e equipamentos e o uso do solo têm ampliado drasticamente, como nos sistemas de cultivo intensivo, onde se tem notado o maior risco de compactação por conta das 9 operações culturais adicionais e aumento da regularidade do tráfego de máquinas (AMURI; BRYE, 2008).

Revela-se com as pesquisas que a compactação amplia a resistência do solo à penetração, o peso específico aparente do solo (DIAS JUNIOR et al., 1999) dificulta a

infiltração de água, a aeração do solo e o crescimento das raízes, isto porque ela influencia na diminuição da porosidade e modificação na continuidade dos poros (DIAS JÚNIOR, 2000).

A disponibilidade de nutrientes pode estar sendo diminuída juntamente com o número de microrganismos devido à compactação (LEE et al., 1996)

A Estrutura do solo está sendo modificada e assim causando a quebra de suas resistências naturais devido o tráfego de veículos pesados, onde essas resistências encontram-se interligadas por forças de atração e repulsão e, conseqüentemente, alterando o fluxo de água no solo. Contudo, ocorrerá uma diminuição da produtividade e um aumento dos níveis de erosão que geralmente diminui a taxa de infiltração, aumentará o escoamento superficial já, uma vez que a velocidade da água no perfil do solo depende da dimensão dos poros (SEIXAS, 2000).

Com o esforço de compactação aplicado no solo, as características do solo vem se alterando juntamente com os efeitos do conteúdo de água no mesmo, logo: se o teor de água aumenta a resistência à compactação diminui, devido à maior lubrificação entre as partículas do solo. Para os valores de densidades que são considerados prejudiciais, consideram-se em torno de 15 a 20% maiores que o valor inicial da densidade média do solo (SEIXAS, 2000).

Segundo Lima e Sirtoli (2006), quando forças mecânicas superiores a capacidade de apoio, impostas pelo tráfego de máquinas agrícolas estas alteram a estrutura do solo e também o arranjo de agregados, logo assim motivando mudanças na porosidade, que conseqüentemente refletem nos fluxos da solução e ar do solo, isso é reflexo da compactação do solo. Dessa forma as plantas são obrigadas a situações adversas ao seu desenvolvimento, devido, principalmente, as limitações apresentadas ao estabelecimento do sistema radicular.

Nas camadas mais superficiais a compactação tende a ser mais expressiva devido o tráfego de tratores e implementos agrícolas, isso resulta no aumento da energia de tração (HÅKANSSON, 2005), assim acarretando maiores despesas com combustíveis; assim como a diminuição da profundidade explorada pela raiz (COLLARES et al., 2006). Reichert et al. (2009) citam que em áreas agrícolas a compactação ocorre até os 0,20 m de profundidade, enquanto em áreas florestais atinge maiores profundidades.

Porém, segundo Keller et al. (2002), são vistos de menor importância os efeitos causados pela compactação nas camadas superficiais visto porque esta pode ser removida no preparo do solo. Já nas camadas subsuperficiais a compactação deve ser tratada de forma mais preocupante, pois esta demanda altos custos e também causa redução na produtividade das culturas (ALAKUKKU et al., 2003; CHAMEN et al., 2003).

Para Queiroz-Voltan et al. (2000) Mesmo em um solo com condições de acidez adequada e boa adubação, as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes disponíveis, pois com desenvolvimento radicular prejudicado, a taxa de absorção dos nutrientes Além disso, há a diminuição do espaço poroso do solo, diminui a quantidade de oxigênio disponível, e assim limitando o desempenho de processos metabólicos da planta, isso tudo devido à compactação que começa afetando o crescimento radicular, com conseqüências para a parte aérea e produtividade.

Quando as pressões aplicadas sobre o solo são maiores do que a capacidade de suporte, o risco de compactação se torna elevado, sendo a umidade um dos responsáveis por essa diminuição da capacidade de suporte (ALAKUKKU et al., 2003). Cada solo apresenta um comportamento em relação à compactação, principalmente pela sua distribuição do tamanho de partículas e mineralogia. O incremento da matéria orgânica no solo e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, além de contribuírem para maior atividade biológica e disponibilidade de nutrientes para as plantas, podem minimizar o efeito da compactação. (BRAIDA, 2004).

### **3.2 - Causas da compactação**

As forças causadoras da compactação participantes no solo podem ser classificadas em externas e internas. São encarregados pelas forças externas: tráfego de veículos, animais ou pessoas e o crescimento de raízes que se aproximam as partículas do solo. Os ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e degelo e expansão e contração da massa do solo respondem pelas forças internas (Camargo & Alleoni, 1997).

Uma fonte natural de compactação pode ser uma gota de chuva, pois quando a mesma cai sobre o solo descoberto, a sua força poderá causar compactação e desagregação aos poucos do solo. Conforme Bortolozzo e Sans (2001), para saber qual a extensão dos efeitos causados pela gota de chuva, deve-se conhecer algumas de suas características, tais como: intensidade, diâmetro médio e a velocidade final das gotas médias. Laws (1940) e Wischmeier e Smith (1951) mostraram que a relação gotas com maiores diâmetros apresentam uma maior velocidade final, e que quanto maior for a duração da chuva aumentara também a porcentagem de gotas maiores,

Segundo Schaefer et al. (2002), a quebra mecânica dos agregados se dá por conta do impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo, onde isso resulta na formação de uma camada adensada na superfície do solo que se dá o nome de selamento superficial. Conforme Agassi, Morin e Shainberg (1985), esse selamento ocorre por dois mecanismos (1)

fragmentação física dos agregados do solo e seu adensamento; (2) dispersão físico-química e migração das partículas de argila para a região de 0,1 a 0,5mm de profundidade, onde se alojam, obstruindo os poros. O primeiro mecanismo predomina e é determinado pela energia cinética das gotas. O segundo, é controlado principalmente pela concentração e composição de cátions no solo e pela aplicação de água. Os dois mecanismos atuam simultaneamente e o primeiro incrementa o segundo.

Apesar de o selamento superficial seja uma pequena camada compactada de espessura reduzida, a mesma ocasiona alterações na taxa de infiltração de água no solo e, também, funciona como impedimento a emergência das plantas. Lal (1974), em uma área cultivada com milho por um ano, e em outra preparada e sem cobertura, mantida pelo mesmo período, ele comprovou uma redução de 40 e 73% na infiltração acumulada respectivamente, comparadas com uma área sob floresta. Segundo o autor, as diferenças foram em virtude de às alterações na estrutura, sobretudo na superfície; pelo selamento ocasionado pela energia cinética das gotas de chuva.

Uma fonte externa de compactação podem ser os diferentes sistemas de manejo do solo, onde estes têm o objetivo de criar condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas. Mesmo assim, o uso de máquinas cada vez maiores e pesadas para essas operações podem levar a modificações da sua estrutura, como desrespeito às condições mais favoráveis (solo úmido ou consistência friável) para o preparo do solo e causando-lhe compactação, interferindo na densidade do solo, na porosidade, na infiltração de água e no crescimento radicular das culturas, e, conseqüentemente, na redução da produtividade (De Maria et al., 1999).

A compactação esta associada à técnica da mecanização onde esta contribuiu para facilitar e agilizar o trabalho do homem no campo em muitas situações. A produtividade vem sendo comprometida muitas vezes pelo excesso ou pelo uso inadequado de praticas no solo desde o seu preparo até a colheita da cultura (Centurion & Demattê, 1992). O aumento na produção e resultado de trabalho operacional e eficiente no uso de maquinas e implementos agrícolas. Contudo, a mecanização e responsável pela deteriorização das condições físicas do solo, onde o tráfego excessivo, sem o controle das diversas condições do solo, é o principal responsável pela compactação ocasionada por forças mecânicas. Tanto pelo exagerado número de operações como pelo simples tráfego do trator sobre o solo (Beltrame & Taylor, 1980a), quando a carga aplicada for superior à capacidade de suporte do solo (Silva et al., 2002a; Lima et al., 2006b; Veiga et al., 2007).

Onde o tamanho e largura dos pneus não vêm evoluindo de acordo com a evolução das máquinas e implementos que cada vez mais tende a resultar em uma intensidade de uso do solo e em significativas alterações nas propriedades físicas do solo. Além disso, com a adoção do plantio direto, o solo não sofre revolvimento e a compactação não é minimizada pelo preparo do solo nos cultivos sucessivos (Streck et al., 2004).

A ação de semeadoras juntamente com o preparo inicial do solo, são fases iniciais para a instalação de uma cultura. O mecanismo da semeadura de abertura do sulco tipo disco duplo pode compactar a região onde será plantada a semente, associado ao espelhamento lateral gerado pelo disco ao ser colocado no solo, dificultando a passagem de água até a semente e diminuindo o percentual de emergência de plantas, o que não ocorre com o facão, que rompe o solo (Reis et al., 2006).

A principal causa da compactação dos solos e a mecanização, sejam de áreas agrícolas seja florestal, tanto pelo revolvimento do solo como pelo tráfego, propiciando as relações entre ar, água e temperatura, que atuam na germinação, na brotação e na emergência das plantas, o crescimento radicular e praticamente todas as fases de seu crescimento e desenvolvimento vegetal (Letey, 1985; Silva et al., 1994).

### **3.3 - Profundidade de compactação**

O trabalho do homem no campo foi facilitado com a mecanização, porém com o pesado tráfego de máquinas e implementos na semeadura, tratamentos culturais e colheita, levaram aos solos a compactação superficial. Embora, essa compactação era desfeita devido ao constante revolvimento do solo para a semeadura das culturas; porém as camadas mais profundas eram compactadas devido ao contato dos implementos de corte e a pressão do rodado no sulco em aração, denominando-se “pé - de-grade” ou “pé-de-arado”, como constatado por Stone & Silveira (1999), Silva et al. (2003), Reichert et al. (2003) e Alves & Suzuki (2004).

Portanto logo abaixo da camada arável que é a aproximadamente 20 cm de profundidade ocorre o “pé-de-grade” ou “pé-de-arado”, (Silva, 2003). Já nas camadas superficiais um dos principais problemas é a erosão, pois com o solo descoberto o mesmo fica totalmente vulnerável ao impacto das gotas de chuva.

Logo a camada de maior barreira ao crescimento radicular está fixada entre 8 e 15 cm, isso em plantio direto devido à formação do “pé-de-plantio direto”, (Silva, 2003; Genro Junior et al., 2004; Suzuki, 2005). Com o aumento das áreas sob plantio direto, nos dias atuais, tanto

os agricultores quanto os pesquisadores tem um novo desafio, que é a compactação superficial em solo não revolvido. Silva (2003) destaca que no plantio direto as raízes ficam confinadas em um menor volume de solo, isso devido à compactação superficial, já no plantio convencional a compactação é dita subsuperficial devido às raízes ficarem confinadas em um maior volume. Isso torna as raízes a serem mais susceptíveis às variações climáticas e dependentes de água e nutrientes nesse menor volume de solo.

O funcionamento dos discos na semeadora adubadora num solo de plantio direto onde o mesmo mostra uma menor densidade e alta porosidade total, isso ocorrendo na camada de 0-5 cm. Faz-se com que haja uma elevada concentração de raízes e de matéria orgânica, elevada atividade biológica e mais ciclos de umedecimento e secagem (Silva, 2003).

Em solos manejados sob plantio direto na camada superficial está associada principalmente a uma menor densidade, onde acontecem movimentações nas operações de semeadura das culturas de verão e inverno (Genro Junior, 2002). Segundo o autor, o espaçamento médio usado nas culturas de inverno é de 17 cm, e que os mecanismos sulcadores para colocação de semente e adubo mobilizam uma camada de 5 cm ou mais, tanto nas culturas de inverno, quanto nas de verão e nas de cultivo sucessivo, nota-se que cerca de 30 % da área é mobilizada em uma única operação, e que em pouco tempo toda a camada superficial dos solos sob plantio direto é mobilizada e o efeito das cargas se acumula dessa camada para baixo no perfil.

De acordo com as especificações da máquina e seu rodado, condições do solo, número de vezes em que o solo é trafegado e com seu histórico de pressões, além do manejo (se pastagem, floresta ou agricultura), se torna variável a profundidade de compactação.

Na agricultura, graças basicamente ao manejo do solo a profundidade de compactação é variável, mesmo sendo plantio direto ou convencional, se escarificação ou subsolagem. As altas mudanças na densidade de um Latossolo Vermelho-Escuro álico de textura argilosa revolvido, são devido às altas pressões de contato do pneu, por exemplo; um acréscimo significativo da densidade foi causado por uma maior umidade, a passagem de carga reincidente sobre o solo causa um maior efeito na compactação, esta podendo chegar a profundidades, mas elevadas do que as que normalmente são movimentadas pelos implementos de preparo do solo (Novak et al. 1992).

Assim foi realizado um experimento onde foram realizadas 15 passadas do trator na maior pressão de contato do pneu (91 kPa no pneu dianteiro e 100 kPa no traseiro) e no maior nível de umidade (33 %), onde esta umidade é próxima a capacidade de campo, nesse

experimento o aumento da densidade teve seu efeito mais significativo que foi próximo a 60 cm de profundidade.

Em um vertissolo que foi trafegado por uma máquina que tinha 10 e 2 t, respectivamente no eixo dianteiro e traseiro, ocorreu um aumento considerável na densidade do solo, a uma profundidade de 11 cm, e no índice de cone, nas camadas de 0-11 e 13-18 cm de acordo com Radford et al. (2000). Já em um Latossolo Vermelho distro férrico típico onde foi usada uma máquina carregadeira de 10, a resistência do solo à penetração logo após a aplicação da compactação, apresentou aumento significativo até a profundidade de 12 cm, (Suzuki, 2005). Agora com ou sem tráfego de máquinas ocorreu aumento da resistência até 28 cm em um solo franco-arenoso (Streck et al., 2004).

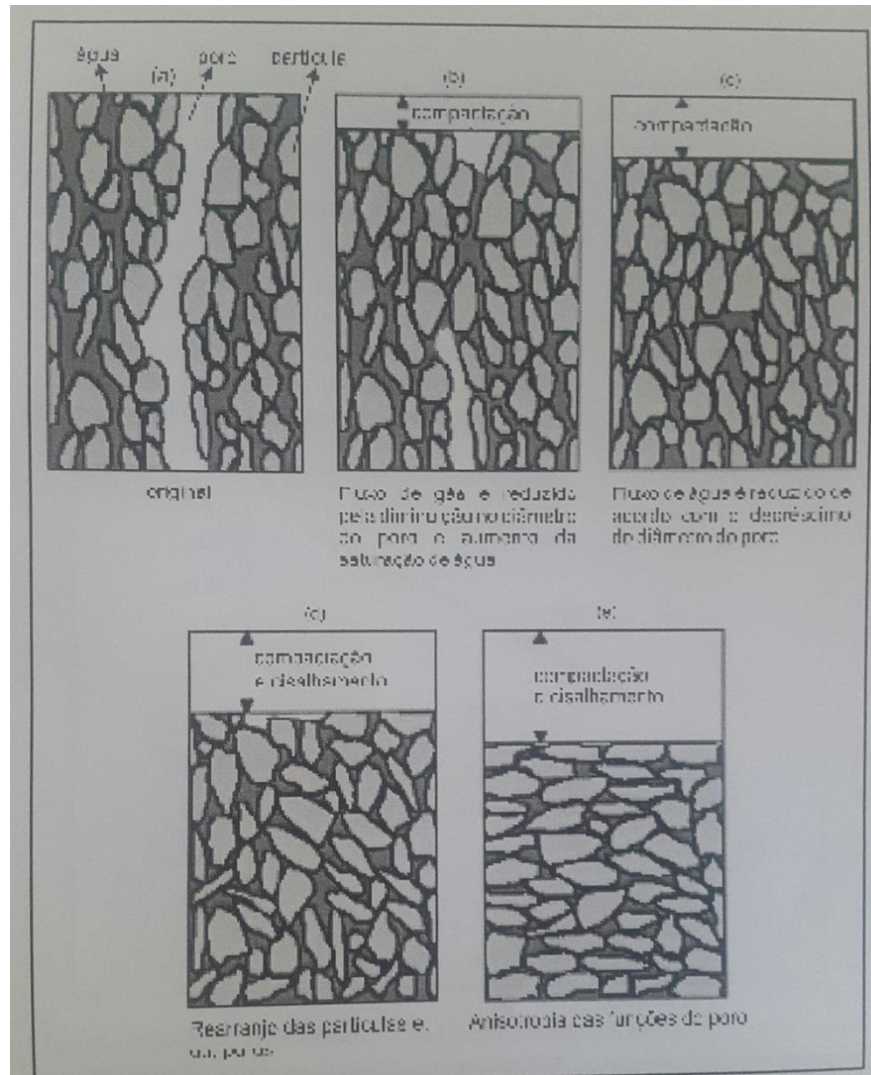
A compactação pelo tráfego de máquinas pode ser dissipada com a presença de palhada na cobertura do solo (Braida et al., 2006). O impacto das máquinas não atinge tanto o solo, pois a palhada atua no solo como um amortecedor onde o mesmo tinha cerca de 12t ha<sup>-1</sup> de palha de milho na superfície, assim aumentando a resistência à penetração até a profundidade de 10 cm, e quando o mesmo estava sem cobertura era de até 50 cm, após seis passadas de um trator com 2.080 kg no eixo dianteiro e 2.980 kg no eixo traseiro em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico com aproximadamente 92 g kg<sup>-1</sup> de argila (Brandt, 2005).

Nas pastagens a compactação esta concentrada somente na superfície, pois ela e menos problemática de ser atenuada do que nos outros sistemas (Silva et al., 2000a). Os bovinos causam a compactação pelo seu pisoteio nas áreas de pastagem que e de cerca de 10 cm, Collares (2005).

### **3.4 - Compactação e relação com as propriedades físicas e mecânicas do solo**

Na figura 1, mostra-se os problemas encontrados no solo com as alterações do volume total de poros e na atividade do solo. Onde no inicio são diminuídos pela compactação do solo os movimentos de água e gás. Assim o movimento de água e diminuído conforme a redução do diâmetro do poro, logo o fluxo de gás tem sua redução em função da diminuição do diâmetro do poro e pelo aumento do enchimento de água no mesmo. Isso causando a anisotropia das funções do poro, que e quando as partículas e, ou, poros do solo se rearranjam conforme a compactação do solo (Horn, 2003).

Figura 1 – Efeitos da pressão e tensão nas funções do poro



Fonte - Modificado de Horn (2003).

Em um solo encharcado a sua condutividade hidráulica, tem em tese alta variabilidade nos dados, onde seu coeficiente de variação está elevado (Silva, 2003). Lima et al. (2006a) tiveram resultado em laboratório para um solo saturado um coeficiente de variação entre 111,5 e 247,9 % para a sua condutividade hidráulica. Genro Junior (2002) e Abreu et al. (2004) constataram um coeficiente de variação de 104 % e 52,8 % de condutividade hidráulica em um solo saturado retirado do campo.

Onde esse coeficiente poderá chegar a valores superiores que 420 % (Warrich & Nielsen, 1980). Gurovich (1982) garante que não é fácil encontrar diferenças significativas entre os tratamentos, devido a sua versatilidade, portanto estando de acordo com os resultados



de Lal (1999) e Lima et al. (2006a). Assim sugerindo que seja feita uma análise a essa propriedade com outros indicadores (Lima et al., 2006a).

Em um solo saturado, a redução da condutividade hidráulica foi devido ao aumento da compactação, isso foi examinada no campo nas profundidades de 8 e 15 cm, com o permeâmetro de Guelph, já com um alto coeficiente negativo para a densidade do solo e positivo para a porosidade total e macro porosidade em um Latossolo Vermelho distrófico (271 g kg<sup>-1</sup> argila) (Beutle et al., 2003). A condutividade hidráulica mostrou correlação negativa e não-significativa com a microporosidade, mostrando ser pouco sensível às variações na compactação do solo.

Em um solo saturado o movimento de água acontece de preferência nos macroporos onde estes devem ter volume de poros de diâmetro maior que 50 µm; com isso espera-se a conexão entre a condutividade hidráulica do solo saturado e a macroporosidade (Mesquita & Moraes, 2004). No entanto a macroporosidade será pouco afetada numa amostra de solo devido à existência de um “mega poro”, já sua condutividade será muito afetada. Enquanto a macroporosidade não apresenta a mesma tendência que a densidade de fluxo, onde a mesma passa por um poro e é equivalente a quarta potência de seu diâmetro (lei de Poiseuille) e, por essas razões, é “fácil” obter valores discrepantes (altos) para condutividade (graças a um “mega poro”).

Foi testado em laboratório um experimento entre a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo de um Latossolo Vermelho distrófico com 500 g kg<sup>-1</sup> de argila e um Latossolo Vermelho distroférico com 600 g kg<sup>-1</sup> de argila, onde e esperado que a retenção de água no solo seja de responsabilidade da microporosidade e a aeração e drenagem seja de responsabilidade da macroporosidade (Silva, 2003).

Foi verificado pelo autor que o maior estado de compactação diminuiu em cerca de três vezes a condutividade em relação a um baixo estado de compactação de acordo com a condutividade hidráulica medida no campo pelo permeâmetro de carga constante de Guelph. Agora analisando a infiltração de água pelo método dos anéis concêntricos, não foi verificada diferença estatística na infiltração de água entre diferentes níveis de compactação, mas existiu diferença entre os solos avaliados, logo relacionado, principalmente, ao teor de argila, manejo, tempo de implantação do plantio direto e rotação de culturas (Silva, 2003). Já na rotação de culturas foi verificado pelo autor um efeito benéfico na infiltração de água no solo mesmo em condições de alta densidade e resistência à penetração.

Em área agrícola, pecuária ou florestal, o processo com que a compactação afeta as propriedades hidráulicas do solo é o mesmo, podendo diferir apenas na intensidade com que essas alterações ocorrem.

### **3.4.1 - Estabilidade dos agregados do solo**

A estrutura do solo, por exemplo, pode ser analisada de forma indireta, através da estabilidade de agregados ou pela análise da densidade, porosidade e resistência a penetração. Logo este assunto é dedicado à estabilidade de agregados do solo, sendo as demais avaliações indiretas da estrutura do solo apresentadas nos tópicos seguintes.

É de suma importância que seja feita uma avaliação no conjunto de propriedades físicas do solo, e que com isso elas possam auxiliar no diagnóstico do solo, evitando, dessa forma, conclusões ou interpretações errôneas, e não apenas em uma única propriedade como, por exemplo, a estabilidade de agregados. Carpenedo & Mielniczuk (1990) analisaram que na camada de 0-10 cm, em plantio direto causaram o aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água, mas a análise da estrutura interna dos agregados apontou que eles foram formados por forças de compressão e não por ação biológica das raízes e microrganismos.

Roth et al. (1991) notaram uma redução nos macroporos na camada de 0-10 cm, em plantio direto e convencional devido à compactação dos agregados, enquanto os meso e microporos dos agregados foram semelhantes a o da mata natural. Na camada de 0-5 cm de plantio direto foram analisados diferentes estados de compactação, variando de 6,42 mm no maior estado de compactação até 4,94 mm no menor estado de compactação, onde o diâmetro médio geométrico de agregados estáveis em água não diferiu entre os níveis de compactação (Silva, 2003).

Em área escarificada houve diferença no maior nível de compactação, fato esse que o autor associou a não inversão das camadas de solo pela escarificação, diminuindo a degradação a estrutura de um Latossolo Vermelho distrófico (500 g kg<sup>-1</sup> de argila) quando comparada com o arado de discos e a grade. Já no Latossolo Vermelho distrófico (500 g kg<sup>-1</sup> de argila) e no Latossolo Vermelho distro férrico (600 g kg<sup>-1</sup> de argila), obtiveram um maior diâmetro médio geométrico de agregados para o maior estado de compactação Na camada de 8-13 cm, o que traria uma suposta condição de favorecimento ao crescimento radicular; mas os resultados de densidade, resistência à penetração e macro porosidade do solo não confirmaram essa suposta melhoria.

Segundo o autor, o efeito compressivo do tráfego de máquinas tem relevante importância no diâmetro médio dos agregados nessa camada.

Devido ao revolvimento anual no preparo convencional foi propiciada uma diminuição na estabilidade dos agregados, no qual em um Podzólico Vermelho-Amarelo (Albuquerque ET al., 1994) e Argissolo Vermelho distrófico típico de textura franco-argilo-arenosa (Marcolan & Anghinoni, 2006), os agregados vão diminuindo de tamanho. Segundo os autores, além das forças destrutivas da ação mecânica, o solo revolvido fica exposto à desagregação pelo impacto das gotas da chuva que, somado à mineralização da matéria orgânica, diminui a estabilidade dos agregados.

O uso de máquinas e implementos agrícolas na camada de 0-15 cm, em áreas cultivadas, onde esse uso atribuiu à formação dos agregados por aproximação de partículas provocada pela ação compressiva, onde logo se deu o elevado diâmetro médio ponderado dos agregados, por peneiramento via seco, assim sem o método de estabilização, pois quando o solo está úmido, a água infiltra nos poros, onde se associa à ação mecânica do peneiramento, que é suficiente para desmembrar a ligação entre os agregados (Silva & Mielniczuk, 1997).

Nos processos de determinação dos agregados por peneiramento seco, os mesmos não se distinguem os agregados formados daqueles que já sofreram um processo de estabilização. Onde foram obtidos em solos os resultados com variação de textura (Latossolo Roxo distrófico de textura argilosa, 80 g kg<sup>-1</sup> de areia, 240 g kg<sup>-1</sup> de silte e 680 g kg<sup>-1</sup> de argila; Latossolo Vermelho-Escuro distrófico de textura argilosa, 400 g kg<sup>-1</sup> de areia, 150 g kg<sup>-1</sup> de silte e 450 g kg<sup>-1</sup> de argila; Latossolo Vermelho-escuro distrófico de textura média, 700 g kg<sup>-1</sup> de areia, 100 g kg<sup>-1</sup> de silte e 200 g kg<sup>-1</sup> de argila; Podzólico Vermelho-Escuro distrófico de textura argilosa, 540 g kg<sup>-1</sup> de areia, 240 g kg<sup>-1</sup> de silte e 220 g kg<sup>-1</sup> de argila) e diferentes manejos (tais como: mata, pastagem nativa, pastagem plantada, plantio convencional, plantio direto).

Nas gramíneas o efeito do seu denso sistema radicular quem são constituintes da vegetação foi mais destacado que o pisoteio contínuo dos bovinos nos valores de diâmetro médio geométrico de agregados em uma área de campo nativo em um Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico (248,70 g kg<sup>-1</sup> de areia, 406,76 g kg<sup>-1</sup> de silte e 344,58 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Lanzanova, 2005).

### 3.4.2 - Macroporosidade do solo

Os macroporos são poros de tamanho suficiente para acomodar raízes e serem de habitat para certos animais do solo, os macroporos são geralmente encontrados entre as unidades estruturais do solo, onde esses conseguem pela ação da gravidade drenar a água e realizar a difusão de gases.

O valor crítico para a grande porosidade parece está bem determinado. Vários autores consideram o valor desta de  $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  como sendo determinante para o crescimento das plantas (Baver, 1949; Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968; Kiehl, 1979; Gupta & Allmaras, 1987). Contudo, Van Lier (2001) afirma que a porosidade do solo, a profundidade a ser aerada e o nível de  $\text{O}_2$  pode influenciar de maneira positiva na porosidade de aeração mínima a ponto de fazer uma oxigenação completa em um sistema radicular.

Para a equação dos termos físicos apresentados no processo de oxigenação para a estimativa da porosidade de aeração mínima, foram utilizados valores obtidos através da literatura para a substituição da equação apresentada, com isso o autor verificou que para as culturas com um sistema radicular não muito profundo (em torno de 10 cm), os valores da porosidade de aeração ficariam em torno de  $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  aproximadamente, enquanto isso em condições mais profundas que o solo anterior e maior consumo de  $\text{O}_2$  quando associados aos climas tropicais a necessidade de porosidade de aeração atingiria valores bem próximos que os apresentados anteriormente, no caso,  $0,20 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ .

Por meio da relação positiva e não-linear da altura do milho e da porosidade de aeração no sistema direto e convencional, o grande crescimento do milho foi parado muito rápido no valor em questão de  $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  da porosidade em questão (Silva et al., 2004a). Contudo houve uma faixa de aeração entre  $0,05$  e  $0,15 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , no qual se pode perceber que o crescimento da planta teve um aumento considerável quando se foi acrescentado porosidade de aeração e observou - se também que seu crescimento foi de alterado para não alterado nos dois sistemas de manejo. No devido estudo da macroporosidade a porosidade de aeração de  $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  demonstrou um crescimento relativo de 80% e 75% respectivamente, para ambos os plantios estudados. Uma macroporosidade mínima de  $0,14 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  foi estimada por Hodgson & MacLeod (1989) para que pudesse ocorrer difusão dos gases em solo argiloso.

### 3.4.3 - Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) juntamente com a densidade do solo (DS) são atributos físicos que influenciam diretamente o crescimento das raízes e, conseqüentemente, a parte aérea das plantas. O efeito do impedimento mecânico sobre o desenvolvimento radicular é dependente das características pedológicas e das práticas de manejo a que o solo é submetido. Quando aumenta a resistência à penetração do solo, o sistema radicular apresenta desenvolvimento reduzido, podendo comprometer a produtividade da área.

Através de penetrômetros automáticos, sendo esses penetrômetros de anel dinamométrico ou de impacto (figura 2) pode se avaliar a resistência do solo a penetração (Reinert et al., 2007), (Stolf et al., 1983). Comparando os dois penetrômetros, observou-se que para um solo com 110 g kg<sup>-1</sup> de argila, uma resistência de 2,47 e 2,17 MPa; para um solo com 450 g kg<sup>-1</sup> de argila, os valores foram de 2,96 e 4,38 MPa, respectivamente, para o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto (Stolf, 1991).

E que segundo o autor são equivalentes os meios incompressíveis de pouca elasticidade (solos arenosos), a força estática e a dinâmica, durante nos meios sujeitos a compressões elásticas (solos argilosos), a resistência dinâmica deve ser maior que a estática e a diferença percentual aumentar com a resistência do meio. Para um solo com 271 g kg<sup>-1</sup> de argila foi obtida diferença de 0,53 Mpa com aumento do nível de compactação e menor umidade (0,078 kg kg<sup>-1</sup>) comparando o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto, enquanto, para um solo com 517 g kg<sup>-1</sup> de argila, essa diferença foi de 1,29 Mpa no maior nível de umidade (0,280 kg kg<sup>-1</sup>) (Beutler et al., 2002). Para um solo com aproximadamente 248 g kg<sup>-1</sup> de argila, resultados semelhantes foram observados entre o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto (Roque et al., 2003).

Figura 2 – Aparelho utilizado para fazer as medições nos níveis de compactação das camadas subsuperficiais.



Fonte – Manual do penetrometro Pnt2000

Mas para que não ocorram erros de interpretação, algumas medidas devem ser tomadas nesse tipo de determinação. A resistência à penetração é dependente da umidade e densidade do solo e da distribuição do tamanho de partículas (Busscher, 1990; Canarache, 1990; Pabin et al., 1998). Assim um solo úmido ou menos denso mostra uma menor resistência quando comparado a um solo seco ou mais denso, para a mesma umidade, um solo argiloso apresenta maior resistência que um solo arenoso. Assim integrar o efeito de rachaduras e de poros biológicos existentes no solo, onde a resistência a penetração não é capaz de identificar e integrar esses efeitos; entretanto, as raízes crescem nessas regiões de menor resistência, mesmo em solos com elevada resistência à penetração (Silva, 2003).

Assim recomenda-se a avaliação da resistência à penetração com teor de água próximo à capacidade de campo (Bauder et al., 1981; Lowery & Morrison, 2002). Klein et al. (1998), porém, verificaram que sua determinação apenas quando o solo se encontra próximo à capacidade de campo não é recomendável, visto que grandes variações de densidade poderão não ser detectadas.

Para caracterizar a compactação entre camadas de solo, a resistência à penetração apresentou melhores resultados do que a densidade do solo (De Maria et al., 1999). Avaliando a compactação do solo pela porosidade, densidade e resistência à penetração, esta última melhor evidenciou o efeito do tráfego de máquinas sobre o solo (Streck et al., 2004). Os trabalhos de Genro Junior et al. (2004) e Suzuki (2005) expressam a importância da resistência à penetração em identificar camadas compactadas. Talvez essa determinação seja mais sensível que a densidade e porosidades do solo na detecção dessas diferenças (Abreu et al., 2004). Porém, como a resistência é dependente da umidade e densidade do solo, determinar valores ou faixas de valores críticos ou restritivos torna-se difícil, sendo mais fácil obter esses valores para propriedades como a densidade do solo. Contudo, esses valores ou faixas devem ser buscados dada a importância dessa propriedade.

Embora relatos tenham evidenciado a importância da resistência do solo à penetração, Abreu et al. (2004) dizem que nem sempre o limitante da produtividade das culturas é a resistência mecânica do solo, mas um conjunto de fatores, tais como: a própria resistência do solo à penetração de raízes, o espaço aéreo destinado às trocas gasosas e a quantidade de água disponível para as plantas (Letey, 1985; Silva et al., 1994; Tormena ET al., 1998; Silva, 2003).

A determinação da resistência à penetração é um método fácil e de rápida obtenção dos dados, mas apresenta o inconveniente de ser dependente de alguns fatores já

mencionados, causando a opção, muitas vezes, pela avaliação de outras propriedades como a densidade do solo, que revela menor interferência desses fatores, especialmente da umidade. Silva (2003), porém, ressalta a maior sensibilidade da resistência à penetração em detectar diferenças entre manejos do solo em comparação a determinações que consideram a relação massa/volume.

Na literatura, os trabalhos têm apresentado diferentes valores de resistência à penetração considerados críticos ou restritivo ao desenvolvimento e produtividade de plantas. Essa variação pode estar associada ao tipo de solo, espécie ou variedade envolvida e umidade do solo no momento da avaliação. Talvez seja importante padronizar a inclusão da umidade durante a avaliação da resistência à penetração, de modo que os resultados obtidos nas diferentes pesquisas possam ser comparados. Uma possibilidade de padronização seria por meio de equações de ajuste, como as desenvolvidas por Busscher (1990) ou Canarache (1990).

O modelo não-linear desenvolvido por Busscher (1990)  $RP = a\theta^b Ds^c$  considera, no ajuste da resistência à penetração (MPa), a umidade volumétrica ( $\theta$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), a densidade do solo ( $Ds$ , kg dm<sup>-3</sup>) e os parâmetros empíricos ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ). Esse modelo tem sido amplamente utilizado em estudos de compactação e qualidade do solo (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Tormena et al., 1999; Silva, 2003; Genro Junior et al., 2004; Barreto Riquelme, 2004; Bervaldo, 2005; Collares et al., 2006).

O modelo desenvolvido por Canarache (1990), observa que a textura torna a resistência a penetração dependente, e assim representada pela argila, e da densidade do solo. Onde a umidade não foi incluída no modelo pelo fato de as amostras terem sido mantidas em igual conteúdo de água. Modelo este que foi analisado em laboratório utilizando amostras de solo com estrutura preservada. Busscher et al. (1997), analisaram a resistência à penetração e umidade do solo que estão relacionadas a algumas equações, mas verificaram que apenas uma equação simples não se ajustou aos dados para todos os tratamentos, que incluíam diferentes culturas e manejos do solo. Logo teriam de serem feitas correções individuais, para cada tratamento, Quando foram utilizadas equações múltiplas, diferenças poderiam não ser reais ou serem atribuídas a manifestações das diferenças nas correções, não sendo a correção, nesse caso, possível.

O modelo desenvolvido por Busscher (1990) comparou melhor o efeito da densidade e umidade do solo com os valores de resistência à penetração em trabalho realizado por Silva (2003) para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (120 g kg<sup>-1</sup> de argila), Latossolo Vermelho distrófico (500 g kg<sup>-1</sup> de argila) e Latossolo Vermelho distroférico (600

g kg<sup>-1</sup> de argila), comparado aos modelos lineares que relacionam a resistência à penetração com a umidade (Martino & Shaykewich, 1994; Genro Junior et al., 2004).

Diferentes profundidades e densidades do solo foram estimadas por (Genro Junior et al. 2004), considerando Funções lineares entre resistência à penetração e umidade do solo. Diferentemente de Busscher (1990), a densidade do solo não entrou nos modelos, o que dificulta seu uso para diferentes condições de densidade. Houve decréscimo da resistência à penetração com aumento da umidade e, para uma mesma umidade, houve aumento da resistência à penetração com aumento da densidade. Por meio de equações lineares, a umidade explicou apenas 20 % da variação da resistência à penetração, e um modelo não-linear, utilizando dados de resistência à penetração, densidade e umidade do solo, indicou que apenas 23 % da variação da resistência à penetração foi explicada por essas duas propriedades para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (Barreto Riquelme, 2004).

No solo a umidade tem sua variação de modo espacial e temporal solo (Libardi et al., 1996; Gonçalves et al., 1999). Logo na penetração de raízes, durante o ciclo das plantas, onde as plantas estão sujeitas a períodos de maior ou menor resistência Silva (2003), Barreto Riquelme (2004), Collares ET al. (2006) e Lima et al. (2006a) para um Argissolo de textura arenosa com a cultura do feijoeiro. Onde períodos estratégicos, como nas fases iniciais de crescimento radicular e fase vegetativa, devem ser feitas avaliações da resistência à penetração, uma vez que as raízes estarão com maior crescimento.

Na criação de poros condutores de água, a “escarificação biológica” (cultivo mínimo de crotalaria), se tornou mais eficiente em médio prazo, onde esta foi analisada pela condutividade hidráulica do solo saturado no campo pelo permeâmetro de Guelph, que a escarificação mecânica de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico arênico (Abreu et al., 2004). Em compensação o resultado é inverso se o indicador for a resistência a penetração. Logo, segundo os autores, a propriedade hídrica ou mecânica do solo a ser empregada como indicadora na avaliação da eficácia da ruptura da camada compactada do solo depende do processo físico priorizado: a infiltração e redistribuição de água ou a penetração e o crescimento de raízes.

Esses resultados de Abreu et al. (2004) confirmam o que já foi constatado por outros autores (De Maria et al., 1999; Genro Junior et al., 2004; Streck et al., 2004) que a resistência à penetração é uma medida eficiente para caracterizar camadas compactadas, mas não para identificar rachaduras e poros biológicos (Silva, 2003).

A maioria dos trabalhos busca valores ou faixa de valores críticos que possam resistir à penetração e que restrinjam o crescimento da planta. Porém ainda há muitas



incertezas em relação a esses valores, mesmo as diferentes plantas respondem diferentemente aos valores críticos, apesar dessa avaliação seja bem mais sensível em identificar camadas do solo compactadas, esta não considera a bioporidade do solo, que parece ser muito importante para o crescimento das raízes das plantas em solos altamente compactados. Buscando apontar um valor ou uma faixa de resistência a penetração que seja reduzido ao crescimento da raiz, muitos testes vêm sendo realizado no campo e em laboratório ou em casa de vegetação, sob condições contidas.

De forma geral, em condições experimentais controladas em laboratórios ou casa de vegetação, os níveis de compactação são nomeados artificialmente, com uma camada homogênea, e isso não ocorre no campo. Contudo o controle de umidade do solo em laboratório é um fato que raramente se consegue no campo, apesar de está em condições com muita água.

Canarache (1990) deu à idéia de alguns limites resistentes a penetração considerando sempre o crescimento da raiz sob condições do laboratório. Valores entre 2,6 e 10 MP causariam alguns problemas á valores altos e acima de 10 MP, fazendo com que não possibilite o crescimento radicular. Contudo Taylor et al. (1966) afirmou que trabalhando em condições controladas observou - se que  $RP > 2$  MPa como restritiva; Meroto Jr. & Mundstock (1999), com o teste feito em vaso verificou - se forma rápida que a resistência de 2 MPa ocasionou uma mínima redução da massa das raízes secas, parte aérea e comprimento radicular do trigo, nisso para uma resistência de 3,5 MPa as restrições foram muito grandes.

O diâmetro médio e a massa de matéria seca do sistema radicular da soja tiveram um grande aumento até o valor de resistência a penetração de, respectivamente 2,07 e 1,99 Mpa, em uma amostra de um latossolo vermelho distrófico (217 g kg<sup>-1</sup> de argila), com uma estrutura preservada e estabilizada a tensão de 0,01 Mpa (Beutler & Centurion, 2004a). Com a queda da produção da soja ocorreu um valor de resistência a penetração de 0,85 Mpa, na camada de 5-15 cm, associado ao decréscimo de 18% da densidade das raízes.

Houve diminuição da produção da cultura do arroz a partir da resistência do solo a penetração de 2,38 e 2,07 Mpa, respectivamente, para um latossolo vermelho distrófico típico textura média (687 g kg<sup>-1</sup> de areia, 42 g kg<sup>-1</sup> de silte e 271 g kg<sup>-1</sup> de argila) e um latossolo vermelho eutroférico típico textura argilosa (277 g kg<sup>-1</sup> de areia, 256 g kg<sup>-1</sup> de silte e 517 g kg<sup>-1</sup> de argila) para os seguintes valores de água de 0,14 g kg<sup>-1</sup> 0,27 g kg<sup>-1</sup>, correspondentes à tensão de 0,01 Mpa, em casa de vegetação (Beutler & Centurion, 2004b). O grande rendimento de matéria seca da parte aérea foi restringido a partir de 2,30 e 2,90 Mpa, respectivamente, para latossolo vermelho distrófico típico textura média e latossolo vermelho

eutroférico típico textura argilosa.

Uma resistência a penetração de 1,66 a 2,22 Mpa, para a cultura da soja, e de 0,27 e 2,38 Mpa, para a cultura do arroz, para as capacidades de água de 0,11 kg<sup>-1</sup>(tensão de 50kpa) e de 0,14 kg<sup>-1</sup>(tensão de 10kpa), caiu bastante o rendimento das culturas em questão um latossolo vermelho distrófico típico textura média (687 g kg<sup>-1</sup> de areia, 42 g kg<sup>-1</sup> de silte e 271 g kg<sup>-1</sup> de argila) em vaso (Beutler et al., 2004a). Uma resistência de 3,05 e 2,81 Mpa, para a cultura de soja e de 0,43 e 2,06 Mpa para a cultura de arroz, nisso os teores de água para essas duas culturas são: 0,24 kg<sup>-1</sup>(tensão de 50 kpa) e de 0,27 kg<sup>-1</sup>(tensão de 10kpa), caiu muito o rendimento em um latossolo vermelho eutroférico típico textura argilosa (227 g kg<sup>-1</sup> de areia, 256 g kg<sup>-1</sup> de silte e 517 g kg<sup>-1</sup> de argila).

Com um o crescente aumento do teor de água, pode - se aturar um maior valor de resistência a penetração, e o menor valor crítico de resistência a penetração com o decréscimo do conteúdo de água pode ser indicio de uma interação com efeito do potencial de água no solo, delimitando a atividade fisiológica da referida planta (Beutler et al., 2004a).

Trabalhos experimentais realizados no campo com o intuito de obter uma resistência crítica ou restritiva as plantas, com mais segurança, a situação que as plantas sofrem, sob condições climáticas diferentes durante seu ciclo e heterogeneidade e bioporosidade do solo. Trabalhando no campo, Laboski et al. (1998) apontou que o valor era restrito e de 3,0 Mpa. Uma resistência a penetração de 2,09 Mpa observada no campo poderia estar estabelecendo um decréscimo no crescimento das raízes desta cultura em um latossolo roxo distrófico (750 g kg<sup>-1</sup> de argila) (De Maria et al., 1999).

Assim como para a porosidade de aeração, o tamanho do milho não foi perdido bruscamente no valor de 2 Mpa observado no campo, julgado como critico para alguns autores. Apesar de ter sido determinado para crescimento radicular, contudo não é considerado adequado relacionar tal valor com o crescimento das folhas (Silva et al., 2004a).

Uma resistência a penetração de 2 Mpa apresentou um crescimento relativo da parte aérea de 69% para o sistema de plantio direto e 65% para o sistema tradicional. O valor de resistência a penetração, avaliada por meio de pesquisas no laboratório com um penetrômetro e teor de água retida à tensão de 10 kPa, apartir do qual ocorreu um decréscimo da produção de soja, com os valores entre 2,24 e 2,97 MPa em um latossolo vermelho distrófico típico textura média (635 g kg<sup>-1</sup> de areia, 35 g kg<sup>-1</sup> de silte e 330 g kg<sup>-1</sup> de argila) (Beutler et al., 2006).

Observou - se uma grande variedade de valores críticos de resistência a penetração para as plantas, contudo a busca por esse valor ainda é um campo fraco para pesquisas. A

dificuldade é padrão como se pode observar nos trabalhos, à umidade ou a tensão em que são realizadas as avaliações resistentes a penetração, bem como os tipos de equipamentos utilizados.

Apesar disso, trabalhos realizados no campo e em casa de vegetação fornecem condições diferentes para as pesquisas em questão difícil fazer as comparações em casa de vegetação, as condições são dominadas, enquanto no campo há grande interferência da grande variedade climática e da estrutura do solo incluindo a bioporosidade, que não foi detectada pela resistência a penetração. Uma tática para padronizar a resistência a penetração (RP, MPa) de acordo com a umidade volumétrica ( $q$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e densidade do solo ( $D_s$ , kg dm<sup>-3</sup>) é a referência não-linear evoluído por Busscher (1990) ( $RP=aq^b D_s^c$ ), como já foi visto anteriormente.

Assim as observações de campo aliada a outras avaliações e a avaliação da resistência à penetração se tornam interessantes. Onde sua avaliação, juntamente com a determinação da densidade do solo ou abertura de trincheiras para observação do crescimento radicular, é fundamental para melhor embasamento dos resultados de resistência à penetração.

#### **3.4.4 – Densidade e porosidade do solo**

As variações no volume de solo estão relacionadas a propriedades do solo como a densidade e a porosidade; logo, estão altamente relacionadas com a compactação do solo. Onde a relação inversa com a porosidade e apresentada pela densidade. Onde diminuição da porosidade ocorre com os poros maiores (macroporos), que esses são responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo. Poros maiores que 50 µm são considerados macroporos e são os primeiros a serem destruídos no processo de compactação.

Poros do solo sob preparo convencional, não conduzem água tão eficientemente quanto os poros do solo sob plantio direto, mesmo tendo sua porosidade total inferior à do preparo convencional, os poros do solo utilizado com plantio direto se tornam mais eficiente (Wu et al., 1992), consequência dos poros biológicos ou bioporosidade no plantio direto (Costa et al., 2003). Onde quando sua capacidade de suporte é vencida ocorre uma redução de volume do solo e acontecem o deslocamento e a ordenação das partículas sólidas nos espaços vazios.

No decorrer do processo de compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, reduzem e são substituídos por poros menores, principalmente pelos que retêm água. Essa diminuição da porosidade de aeração pode ser 1,5 a 2 vezes maior que o decréscimo no espaço poroso total (Boone & Veen, 1994). A redução do coeficiente de difusão do O<sub>2</sub> vai

obedecer à geometria e estabilidade dos canais de poros de aeração e do grau de deformação durante a compactação (Boone & Veen, 1994).

Um aumento da densidade do solo causou redução da macroporosidade e porosidade total. Com isso Houve relação entre o volume de macroporos e porosidade total com a densidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico franco-argilo arenoso (Alves et al., 2005). Onde foi notado em um Latossolo Vermelho distro férrico típico com 680 g kg<sup>-1</sup> de argila, Um decréscimo da macroporosidade com aumento da densidade, (Genro Junior, 2002).

Onde que com o um aumento na densidade do solo acarretou maiores valores de micro porosidade e menores de macro porosidade em um Latossolo Vermelho distro férrico com 427 g kg<sup>-1</sup> de argila (Secco et al., 2004). Logo foi observada entre sistemas de manejo do solo e cultivo de culturas em um Cambissolo Húmico alumínico léptico (443 g kg<sup>-1</sup> de argila) Uma pequena variação no volume de micro poros em relação à variação ocorrida no volume de macroporos (Bertol et al., 2004).

Teoricamente, os diferentes sistemas de manejo influenciaram pouco na densidade do solo e na porosidade, sendo as mais altas alterações verificadas preferencialmente no plantio direto quando se compararam as profundidades, em solos com teor de argila variando de 86 a 664 g kg<sup>-1</sup> (Suzuki, 2005). Assim se tornando mais comum os efeitos na forma e distribuição dos poros ao longo do perfil do solo e menos evidente, o efeito do preparo sobre os valores de porosidade do solo (Schaefer et al., 2001).

Em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico com aproximadamente 92 g kg<sup>-1</sup> de argila onde este foi revolvido e trafegado por um trator com 2.080 kg no eixo dianteiro e 2.980 kg no eixo traseiro, onde não foi observado efeito significativo na redução da densidade e porosidade devido à superfície do solo estar coberta com cerca de Com 12 t ha<sup>-1</sup> de palha de milho (Brandt, 2005). Assim o número de passadas (0, 2 e 6) apresentou efeito significativo, sendo duas passadas o efeito mais significativo até a camada de 10-20 cm, com aumento da densidade e redução da macroporosidade e pororosidade total, não tendo efeito na microporosidade. Para seis passadas, o aumento da densidade mostrou-se nulo ou pequeno em relação a duas passadas do trator.

Após a escarificação de um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média (635 g kg<sup>-1</sup> de areia, 35 g kg<sup>-1</sup> de silte e 330 g kg<sup>-1</sup> de argila), onde no mesmo foi passado um trator com peso de 11 t, assim aumentando sua compactação que foi verificada pelo aumento da resistência à penetração, da densidade do solo e da macroporosidade, e redução da macroporosidade, sendo mais pronunciada a alteração do diâmetro de poros e da densidade após uma passada do trator, com menores efeitos com o aumento do número de passadas

(Beutler et al., 2006). Assim segundo os autores os poros de maior diâmetro (macroporos) são menos resistentes e se deformam, formando poros de menor diâmetro, que são mais resistentes e suportam maiores pressões.

Em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (89 g kg<sup>-1</sup> de argila), onde aconteceu uma diminuição da total e macro porosidade sem aumento da microporosidade com o aumento do estado de compactação (Streck et al., 2004). E que nesse mesmo solo, devido o tráfego de uma máquina de 10 t, onde a mesma causou uma compactação adicional e elevou os valores de densidade do solo e reduziu a porosidade total pela diminuição da macroporosidade (Collares, 2005).

Em um pomar de laranja onde o mesmo foi sujeitado ao tráfego de máquinas agrícolas, onde esta foi à área mais afetada pelo uso agrícola, devido principalmente pela ausência de cobertura vegetal nesse ponto de amostragem e pelo fato de ter servido como linha de passagem de máquinas no início do plantio. Logo assim os bioporos permaneceram na projeção da copa, mas em tamanho reduzido pela compactação, e houve redução de 50 % da porosidade total, quando comparado a uma área sob mata, aumentando, dessa forma, a diversidade de poros (cavidades, canais, fissuras, vesículas, câmaras e empacotamento), em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco-argilo-arenosa (Lima et al., 2005).

Enquanto as máquinas podem reduzir nas áreas agrícolas ou florestais a porosidade e aeração do solo, o pisoteio animal também pode afetar na pecuária, essas propriedades. Assim em um sistema de integração lavoura pecuária, onde principalmente na camada superficial do solo (0-5 cm) o pisoteio animal alterou a densidade, macroporosidade e porosidade total, com redução da macroporosidade também na camada de 5-10 cm em um Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (248,70 g kg<sup>-1</sup> de areia, 406,76 de silte e 344,58 de argila) (Lanzanova, 2005).

#### **3.4.5 – Teor de água no solo**

Dias Júnior (2000) destaca que a umidade é uma causa que determina a capacidade de apoio de carga do solo. Seixas (2000) que a compactação se torna mais crítica quando o teor de água cresce a resistência à compactação diminui, devido à maior lubrificação entre as partículas do solo, e assim atingindo os limites plásticos, e afirma ainda que os efeitos do conteúdo de água se alteram com as características do solo e o esforço de compactação aplicado sobre este.

Logo, a umidade é o fator que regula a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo (FIGUEIREDO et al., 2000). O deslocamento das partículas no solo só é possível com

a água, pois ela atua como lubrificante entre as partículas permitindo o deslocamento das mesmas onde isto é favorecido pelo aumento da umidade. Este processo continua até que a água sature praticamente todos os poros do solo. A partir desse momento, a cada incremento no conteúdo de água não corresponderá um incremento na densidade, visto que a água não pode ser comprimida (SMITH et al., 1997; SILVA et al., 2000b).

A umidade é fator importante que influencia a compactação do solo, atuando como um lubrificante, facilitando o rearranjo das partículas do solo quando este é submetido a pressões. A relação entre a umidade e compactação do solo é dependente do tipo de solo. (SILVA et al., 2006c).

As operações agrícolas, quando realizadas sem o controle do teor de água do solo (Figura 3) provocam aumento da área compactada (PEDROTTI e DIASJUNIOR, 1996 e SEVERIANO et al., 2008) também relatado por Gysi et al. (1999), que observou que um teor de água ligeiramente inferior na camada mais superficial do solo, pôde reduzir o efeito da compactação causada pelo tráfego. Yavuzcan et al. (2005) também estudou o efeito da água na compactação do solo e notou que o teor de água no solo pareceu ser o mais decisivo fator para a compactação provocada pelo rodado. Sob condição de umidade crítica, o solo deformou-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas permanentes (deformação plástica do solo) (SILVA, et al., 2006; ASSIS et al., 2009).

Figura 3 - Efeito do tráfego agrícola em Nitossolo Vermelho distroférico sob condição de alto teor de água no solo.



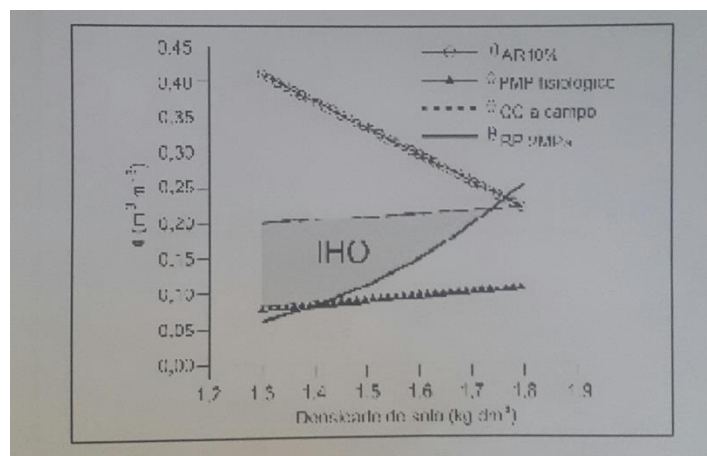
Fonte – Dias Jr. 1999

### 3.4.6 – Intervalo hídrico ótimo

Considerando que o crescimento e desenvolvimento das plantas são diretamente influenciados por fatores como: a temperatura, aeração, umidade e resistência à penetração, onde o fator controlador dominante é a umidade, sendo os outros três fatores influenciados pelo conteúdo de água. Nesse sentido, Letey (1985) propôs o conceito de faixa de umidade não-limitante (NLWR – “non limiting water range”). É definido como uma faixa de umidade no solo em que não há limitações ao crescimento das plantas relacionado com a aeração, resistência à penetração e água disponível. Seguindo a linha de pensamento de Letey (1985), Silva et al. (1994) propuseram um índice para quantificar essas relações, modificando o conceito de NLWR para faixa de umidade menos limitante (LLWR – “least limiting water range”). No Brasil, Tormena et al. (1998) utilizaram o índice proposto por Silva et al. (1994), denominando o intervalo hídrico ótimo (IHO).

É importante para definir estratégias de manejo do solo, saber qual a propriedade está limitando o crescimento das plantas, assim visando em aumentar o intervalo hídrico ótimo (Silva, 2003). Agora segundo o autor, as ações relacionadas com o manejo do solo podem aumentar ou diminuir o intervalo hídrico ótimo quando o limite superior for a porosidade de aeração e o limite inferior for a resistência à penetração. Logo quando o limite superior e o inferior do intervalo hídrico ótimo são a umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, o manejo dado ao solo tem menor influência sobre essas propriedades.

Figura 4 – Variação da umidade ( $\theta$ ) e da densidade do solo,

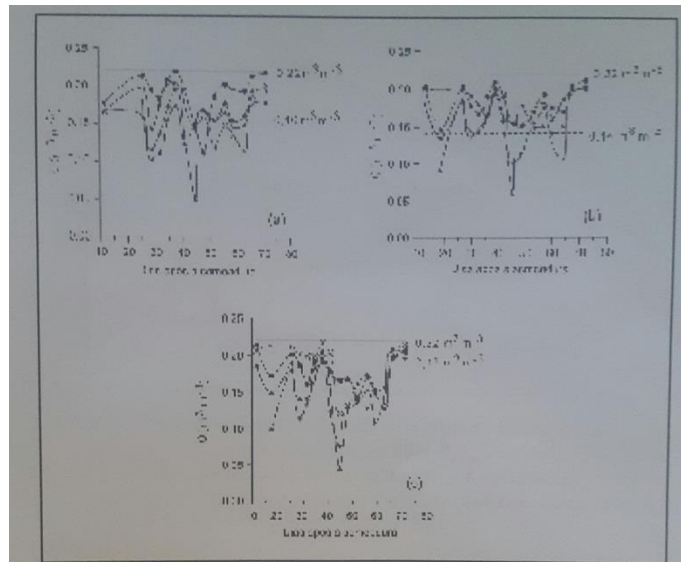


Fonte - Collares et al. (2006).

Uma avaliação útil dos efeitos do manejo na produtividade do solo, pode ser o intervalo hídrico. Onde as técnicas de manejo do solo que maximizam o intervalo hídrico ótimo aumentam o potencial produtivo do solo para as plantas. Assim o conhecimento do intervalo hídrico ótimo de um solo pode auxiliar o produtor a melhorar as condições de crescimento e desenvolvimento para as plantas, auxiliando no momento adequado de aplicar irrigação e na tomada de decisões referentes ao manejo (Benjamin et al., 2003).

Usando a tática do intervalo hídrico ótimo, onde na qual a umidade na capacidade de campo ou na porosidade de aração seja o limite superior e a umidade no ponto de murcha permanente ou na resistência à penetração seja o limite inferior, Collares et al. (2006) definiram que a umidade entre o limite superior e inferior onde a condição física do solo seria ideal para o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro, sem ocorrência de restrições severas em um Argissolo Vermelho distrófico arênico (89 g kg<sup>-1</sup> de argila). Logo onde foi detectada a compactação, a umidade do solo ficou um período abaixo do limite inferior do intervalo hídrico ótimo, sendo esse período durante fases importantes do ciclo de crescimento e reprodutivo do feijoeiro (Figura 4). A escarificação foi eficiente em aumentar a faixa de umidade ideal para o feijoeiro. Essa estratégia também foi utilizada por Silva (2003) para o mesmo solo e cultura.

Figura 5 - Umidade volumétrica do solo



Fonte - Collares et al. (2006).



### 3.4.7 – Grau de compactação

Na especificação da compactação do solo e resposta das culturas em diferentes tipos de solo onde tem se utilizado a relação entre a densidade atual do solo e algum estado padrão ou de compactação máxima (Carter, 1990; Håkansson, 1990; Lipiec et al., 1991; Silva et al., 1997; Suzuki et al., 2007), principalmente para solos minerais (Håkansson, 1990).

Onde se denomina essa relação por grau de compactação ou compactação relativa onde a mesma é expressa em porcentagem. Assim o grau de compactação tem levado vantagem porque podem ser analisados diferentes tipos de solos, já que o efeito da granulometria do solo é eliminado quando se relaciona a densidade atual do solo com a densidade referência. Além disso, o grau de compactação tem apresentado boa relação com características do solo e da planta.

Assim tem-se utilizado na literatura três formas de obtenção da densidade-referência. Onde uma delas é pelo teste de Proctor (Carter, 1990; Twedorff et al., 1999), utilizando amostras com estrutura de solo não preservada. Nas outras duas, obtém-se a densidade-referência pelo teste de compressão uniaxial; uma delas em amostras com estrutura de solo não preservada e aplicando uma pressão de 200 kPa (Håkansson, 1990), e outra aplicando uma pressão de 1.600 kPa em amostra de solo com estrutura preservada (Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2007).

De acordo com medida que o grau de compactação aumenta, torna-se mais estreita a faixa de tensão de água, na qual a porosidade de aeração e a resistência à penetração não são restritivas ao crescimento das plantas (Lipiec et al., 1991). Nesse caso, Suzuki (2005) analisou que com o aumento do grau de compactação a macroporosidade foi reduzida linearmente, e com isso o crescimento radicular da soja teve um aumento linear a resistência do solo a penetração.

Onde uma macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  correspondeu a um grau de compactação de aproximadamente 89 % para solos com  $100 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, 80 % para solos com  $200\text{-}300 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e 75 % para solos com  $300\text{-}700 \text{ g kg}^{-1}$  de argila. No horizonte AP de dois solos com  $120$  e  $70 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e  $300$  e  $290 \text{ g kg}^{-1}$  de silte (solos franco-arenosos), num macro porosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , o grau de compactação correspondeu a um valor de 89 % (Carter, 1990).

Lipiec et al. (1991). Observou na camada de 0 a 10 cm, que com o aumento do grau de compactação, formou-se uma concentração de raízes na superfície do solo, e um decréscimo da profundidade radicular. Logo esses autores verificaram que raízes crescidas em solo

altamente compactado caracterizaram-se por maior diâmetro, alto grau de achatamento e superfície irregular com células da epiderme deformadas.

Assim as maiores produtividades de soja foram obtidas no grau de compactação de aproximadamente 85 % para Argissolos (três Argissolos com argila variando de 86 a 449 g kg<sup>-1</sup>) e 82 % para Latossolos (três Latossolos com argila variando de 428 a 664 g kg<sup>-1</sup>) do sul do Brasil (Figura 5) (Suzuki, 2005). Segundo o autor, o alto grau de compactação pode reduzir a porosidade do solo, diminuindo sua aeração e aumentando a densidade e a resistência do solo à penetração, dificultando o crescimento radicular. Por outro lado, um grau de compactação muito baixo pode ser indicativo de um solo sem estrutura, comprometendo a retenção de água e o contato solo-semente na semeadura.

De modo geral, o crescimento da cultura é afetado adversamente pela compactação do solo; contudo, a máxima produção não será obtida em um solo após seu revolvimento, pois o solo estará muito solto (Arvidsson & Håkansson, 1991). O grau de compactação ótimo para a soja, medindo a densidade referência pelo teste de Proctor, foi de 80 % em um Latossolo Vermelho de textura média (Beutler et al., 2005). O índice de área foliar e a produtividade de grãos da cultura da cevada decresceram, quando o grau de compactação foi aproximadamente 88 e 91%, respectivamente, para dois solos com 60 e 70 g kg<sup>-1</sup> de argila e 680 e 150 g kg<sup>-1</sup> de silte (Lipiec et al., 1991).

Uma compactação entre 77,5 e 84 % apresentou uma produtividade relativa superior ou igual a 95 %, para as culturas de trigo e cevada (Carter, 1990). Em mais de 100 experimentos de compactação em vários tipos de solo da Suécia com a cultura da cevada, obteve-se um grau de compactação de 87 % como sendo ótimo para essa cultura (Håkansson, 1990).

#### **3.4.8 – Pressão de preconsolidação**

A pressão de preconsolidação, que é obtida através de um indicativo da capacidade de suporte de carga do solo, onde por meio da curva de compressão do solo, que considera o índice de vazios ou a densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1996). Assim a aplicação de pressões menores que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas (recuperáveis) no solo e as propriedades físicas mantêm-se constantes, enquanto a aplicação de pressões mais elevadas causa deformações plásticas (não-recuperáveis) e as propriedades físicas do solo alteram-se consideravelmente (Holtz & Kovacs, 1981; Lebert & Horn, 1991).

A compactação adicional ao solo pode ser ou não causada pelo aumento da densidade e com a redução do volume do solo. Assim aplicando menores pressões podem-se ter efeitos benéficos, mesmo que no passado o solo passou por uma pressão de aplicação maior, logo assim, ao mesmo tempo em que aplicando pressões maiores, continua a oferecer efeitos prejudiciais. Assim se torna importante conhecer os níveis de pressão que o solo sofreu no passado e, ou, a umidade do solo no momento das operações agrícolas, evitando, dessa forma, compactação adicional (Dias Junior & Pierce, 1996).

A porosidade total relaciona-se diretamente com a alteração do solo, principalmente com a macroporosidade, indicando que, quanto maior a deformação do solo, maiores serão as reduções de macroporosidade e de porosidade total do solo (Silva et al., 2000b). Logo teremos alguns prejuízos para as plantas e meio ambiente, tal como a redução da aeração e da infiltração de água no solo, podem ocorrer.

Defini-se a compressibilidade do solo, como sendo a resistência do solo em diminuir seu volume quando submetido à pressão, é menos pronunciada em solos arenosos e menos agregados Horn & Lebert (1994). Assim temos alguns fatores dependentes da resistência do solo que são a distribuição do tamanho de partículas, o tipo de argilomineral, o conteúdo e tipo de substâncias orgânicas, a distribuição de raízes, a densidade do solo, a distribuição do tamanho de poros, a continuidade dos poros no solo e nos agregados simples e o conteúdo e, ou, potencial de água no solo afirmam os autores. O solo se torna mais compressivo quanto maior for o conteúdo de argila e menor for o conteúdo de substâncias orgânicas, devido a uma mesma densidade do solo e a um mesmo potencial de água. Onde a um mesmo conteúdo de argila, o solo é mais compressivo quanto menor a densidade e menor o potencial de água. Solos arenosos apresentam maior atrito entre as partículas, o que dificulta a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade (deformação) (Lima et al., 2004a). Solos formados por partículas de diferentes tamanhos normalmente são mais facilmente compactados, pois as partículas menores podem ser encaixadas nos espaços formados entre as partículas maiores (Torres et al., 1993).

Em varias literaturas tem sido apresentado relação significativa entre a resistência à penetração e a pressão de preconsolidação (Canarache et al., 2000; Mosaddeghi et al., 2003; Dias Junior et al., 2004; Lima et al., 2006c). Assim o aumento da compactação do solo, representado pela sua resistência à penetração, aumenta a pressão de preconsolidação. A relação significativa da pressão de preconsolidação e umidade, densidade e resistência do solo à penetração são importantes, pois, a partir dessas propriedades de maior simplicidade de

determinação pode-se estimar a pressão de preconsolidação que é uma propriedade de difícil obtenção, exige equipamento específico e demanda longo tempo.

À medida que se aumenta a densidade do solo, ocorre também um acréscimo médio da pressão de preconsolidação e o solo sofre uma redução de 91 para 58 % no grau de saturação água em um Latossolo Vermelho distrófico típico (550 g kg<sup>-1</sup> argila), e de 93 para 68 % para um Latossolo Vermelho distroférico típico (610 g kg<sup>-1</sup> argila), logo o solo terá sua maior capacidade de suporte, quando mais seco e compactado estiver o solo, onde as partículas e agregados ficaram mais coesos (Secco, 2003). Assim para um grau de saturação inferior a 45 e 60 %, respectivamente, para o primeiro e segundo solo, a pressão de preconsolidação foi pouco influenciada pela umidade e densidade do solo. Em solo úmido, segundo o autor, a água atua como lubrificante entre as partículas, deixando o solo mais macio, alterando o estado de consistência do mesmo e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade de suporte de carga do solo.

Em um pomar de laranja houve sensibilidade da pressão de preconsolidação na avaliação da heterogeneidade da compactação (Lima ET al., 2004a). Onde foi observado pelos autores que não houve diferença estatística quando avaliou-se a pressão de preconsolidação na projeção da copa da planta (316 kPa), no rodado do trator (309 kPa) e no entre rodado (298 kPa), mas diferiu do valor obtido na linha de plantio (174 kPa). Mas na camada de 0 a 5 cm em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico com aproximadamente 92 g kg<sup>-1</sup> de argila, onde se notou aumento significativo da pressão de preconsolidação, quando o solo foi trafegado duas vezes com um trator com 2.080 kg no eixo dianteiro e 2.980 kg no eixo traseiro; na camada de 5-10 cm, houve diferença significativa em relação à área sem tráfego apenas quando submetida a seis passadas. Nas camadas de 10-20 e 20-30 cm, o número de passadas não afetou a pressão de preconsolidação (Brandt, 2005).

Na camada de 0 a 5 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, onde no mesmo ocorreu um aumento nos valores de pressão de preconsolidação devido à passada do rodado traseiro (pressão de inflação de 137,90 kPa) de um trator com massa total com lastro de 7.324 kg (Silva et al., 2003). Assim o tráfego subsequente, necessário ao cultivo, elevou esses valores em sub superfície, tanto na profundidade média de trabalho (24 a 27 cm) como na profundidade de corte dos implementos (arado de aivecas, arado de discos e grade aradora). As soleiras dos órgãos ativos do arado de discos e da grade aradora foram as que mais elevaram a pressão de preconsolidação, consolidando a estrutura do solo na profundidade de corte dos implementos.

### **3.5 – Compactação e relação com o crescimento e produtividade de plantas**

A compactação do solo em níveis intermediários é benéfica às plantas em relação a um solo solto e desagregado. Em níveis elevados, porém, a compactação é extremamente prejudicial às plantas.

#### **3.5.1 – Crescimento radicular**

A restrição ao crescimento radicular é um dos estágios iniciais causados pelo efeito da compactação, que tem conseqüências para o crescimento da parte aérea e produtividade. Assim a primeira parte da planta a sentir os efeitos da compactação é o sistema radicular. Onde o solo pode ser bom quimicamente, mas com a ocorrência da compactação, as plantas não absorvem os nutrientes disponíveis no solo, assim o seu desenvolvimento, e o de novas raízes se torna prejudicado, uma vez que é nelas que ocorre a maior taxa de absorção. Além disso, com a compactação, diminuem os espaços livres do solo e, conseqüentemente, a quantidade de O<sup>2</sup> disponível na rizosfera, podendo ser limitante para o desempenho dos processos metabólicos das plantas (Queiroz-Voltan et al., 2000).

A parte aérea das plantas, que está sujeita a trocas constantes de ambiente, juntamente com o sistema radicular percebe e integra todas as condições, no espaço e tempo, assim se tornam claramente importantes (Reichert et al., 2003). Assim afirma, Suzuki (2005) que um bom indicativo da condição física do solo, mesmo que apenas visual e a avaliação do sistema radicular. Logo diversos são os fatores que causam crescimento deficiente do sistema radicular das plantas (Camargo & Alleoni, 1997), incluindo danos causados por insetos e doenças, deficiência nutricional, acidez do solo, drenagem deficiente, temperatura e compactação do solo, acarretando esta última, ao causar restrições ao crescimento e desenvolvimento radicular, problemas que afetam, direta e indiretamente, a produção das plantas.

Uma boa relação com o crescimento radicular pode ser apresentada pela avaliação da compactação do solo, seja pela densidade, seja pela resistência à penetração. Assim regularmente, a redução do crescimento radicular só se dá com o aumento da densidade ou resistência à penetração. Sendo assim, o potencial de crescimento da cultura e as condições físicas do solo determinam o tamanho da raiz e a taxa de crescimento radicular (Boone & Veen, 1994). Gerard et al. (1982) e Veen & Boone (1990) apontam uma relação inversa entre a resistência mecânica à penetração e o crescimento de raízes.

Nas camadas abaixo de 30-40 cm, em uma área cultivada há três anos sob plantio direto, ocorreu uma restrição ao crescimento de raízes de milho em profundidade, isso pela

ocorrência do intenso tráfego de uma colheitadeira carregada com peso de 117.680 N e em outra área em razão do tráfego intenso de um trator agrícola com peso de 39.227 N, enquanto, na área que recebeu subsolagem e na área sob plantio direto as raízes foram até 50 e 80 cm, respectivamente (Seixas et al., 2005).

Em um Latossolo argiloso (Suzuki, 2005), onde foi realizada uma rotação de culturas com (soja ou milho no verão) onde não foi notado a influencia no crescimento radicular do trigo. Assim foi feita uma avaliação em relação aos três níveis de compactação (plantio direto com compactação adicional, plantio direto e escarificação), onde se notou no plantio direto com compactação adicional um sistema radicular mais superficial, com maior concentração até os 10 cm de profundidade. Cada cultura apresenta um potencial de resistir aos efeitos da compactação. Há culturas ou até mesmo cultivares que apresentam sistema radicular mais agressivo, enquanto outras podem resistir à maior período ao déficit hídrico.

Os solos não são uniformemente compactados pelo tráfego de máquinas (Unger & Kaspar, 1994). Segundo esses autores, pelo fato de a direção do tráfego para muitas operações no campo ser paralela à linha de plantio, o tráfego tende a concentrar-se nas entrelinhas, e algumas entrelinhas são compactadas enquanto outras não. Como resultado, o tráfego pode causar grandes diferenças nas condições físicas do solo nas entrelinhas trafegadas e não trafegadas.

Uma maior resistência a penetração e encontrada nas entrelinhas das culturas, pois na linha o disco de corte ou a haste tipo sulcador ou facão da semeadora rompe a camada de maior resistência, onde isso permite o crescimento do sistema radicular até os primeiros centímetros do solo. Assim os vários níveis de resistência a penetração, não conseguem formar uma camada uniforme, fazendo que criem espaços de maior e menor resistência, permitindo que as raízes cresçam entre esses espaços (Suzuki, 2005).

Como as raízes procuram os espaços livres no solo para crescer no solo, tendo em vista isso a compactação não e apresentada como uma massa continua (Queiroz-Voltan et al., 2000). Portanto, quando uma raiz encontra no solo um poro de diâmetro menor que o seu, ela se expandirá somente se for capaz de exercer pressão suficiente para dilatar o poro (Camargo & Alleoni, 1997).

Em um solo compactado as plantas criam mecanismos de defesa, onde elas expandem suas raízes laterais com o diâmetro suficiente para realizar a penetração dos poros. Contudo, como as raízes laterais respondem à compactação de forma semelhante à de raízes principais, quando há obstáculo ao crescimento, todo o sistema radicular ficará definhado e inteiramente coberto por pêlos radiculares (Camargo & Alleoni, 1997).

Abaixo da camada compactada, em alguns casos pode ocorrer o crescimento radicular, assim associamos isso à heterogeneidade do solo com regiões de maior e menor resistência ao crescimento das raízes, e aos mecanismos que a planta apresenta para penetrar nessas camadas compactadas. Porém, na procura dessas camadas de menor resistência e para criar esses mecanismos de defesa, as plantas gastam muita energia onde isso reflete negativamente na planta, dificultando no seu potencial produtivo.

A compactação é um problema, seja em áreas agrícolas, seja em áreas sob pastagem e floresta; portanto, todas as culturas, anuais ou perenes, estão sujeitas a sofrer os impactos da compactação.

### **3.5.2 – Crescimento aéreo e produtividade**

A fotossíntese realizada pela planta, se dá por meio de um maior crescimento da parte aérea. Assim foi associado à compactação, o menor crescimento da parte aérea do feijoeiro, onde foi notada as restrições ao acesso à água e a nutrientes pela redução do crescimento radicular (Collares, 2005). Logo observou-se que uma máquina de 10 t, reduziu a altura do feijoeiro em 19,6 e 19,1 %, onde a mesma era passada quatro vezes no solo, causando uma compactação adicional em relação ao plantio direto de 12 anos e escarificação, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico com 81 g kg<sup>-1</sup> de argila. O crescimento da área foliar foi mais lento até os 23 dias após a emergência nas parcelas com compactação adicional.

A compactação, principalmente superficial, causada por quatro passadas de uma carregadeira pesando 10 t reduziu a altura das plantas de soja e milho em um Latossolo Vermelho distroférrico típico (Suzuki, 2005). Contudo, o alívio da compactação pela escarificação também não favoreceu a altura dessas culturas, sendo as plantas mais altas verificadas no plantio direto há seis anos. A altura do milho aumentou com acréscimo da porosidade de aeração em anos úmidos e decresceu com aumento da resistência à penetração em anos secos, em estudo realizado em uma propriedade agrícola com solos variando de 58 a 374 g kg<sup>-1</sup> de argila, durante três anos, sob os sistemas plantio direto e convencional (Silva et al., 2004a). A altura do milho foi relacionada, positiva e exponencialmente, com porosidade de aeração e, negativa e exponencialmente, com resistência do solo à penetração, considerando coleta de dados na camada superficial do solo (0-20 cm).

A produtividade das culturas é dependente de vários fatores, como propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, manejo dado à cultura, espécie de planta e fator climático. Alguns solos podem apresentar condições inadequadas, mas uma condição

climática e de precipitação adequada para as culturas pode minimizar esses efeitos. Numa adversidade climática, um solo em boas condições facilita o manejo e planejamento agrícola, pois as variações na produtividade são menores devido à redução dos riscos de queda de produção (Lipiec & Simota, 1994; Suzuki, 2005). De modo geral o produtor só percebe o efeito da compactação quando contabiliza a produtividade e esquece que o crescimento radicular é o melhor indicador da qualidade do solo e o primeiro a sofrer os efeitos da compactação.

A compactação do solo e seus efeitos negativos na produtividade das culturas têm aumentado, resultado do revolvimento reduzido do solo, uso de equipamentos pesados, aumento da carga por eixo e operações de campo quando o solo está úmido. Uma limitada compactação na superfície do solo, entretanto, é considerada benéfica para a semeadura porque não só promove melhor contato semente-solo e rápida emergência, mas também reduz a taxa de secamento do solo. Compactação excessiva, por outro lado, pode impedir o crescimento radicular, limitar a absorção de nutrientes e causar estresse por falta de umidade, resultando em redução na produtividade das culturas (Bicki & Siemens, 1991).

### **3.6 – Pressão inflação dos rodados no solo**

Os pneus agrícolas, são uma das principais partes do trator e da maioria das máquinas agrícolas autopropelidas, logo se tornam importante para os custos operacionais de campo e, principalmente, nos custos finais de sua fabricação. Onde com isso os rodados pneumáticos de um trator agrícola possuem diversas funções importantes tais como o amortecimento entre as irregularidades do solo e o trator, e também garantir o equilíbrio, o deslocamento, o direcionamento, o desempenho operacional. Logo esses rodados influenciam nos resultados de desempenho operacional do trator em relação ao tipo de construção, pressão de inflação, carga aplicada, tipo de dispositivo de tração e do seu desgaste (MONTEIRO, LEONARDO 2008).

A forma construtiva dos pneus tem grande importância na eficiência com que o torque na árvore motriz é convertido em tração na barra. Um trator equipado com pneus adequados, para diferentes condições superficiais de solo, resulta em melhor desempenho geral, com conseqüente aumento da capacidade operacional, melhor qualidade de serviço, menor custo e menor impacto nas condições estruturais do solo.

Entre os fatores que podem influenciar o desempenho de tração do trator agrícola, destacam-se a pressão de inflação e a carga sobre o rodado motriz (YANAY et al, 1999). Os autores realizaram um trabalho com o objetivo de avaliar, em condições normais de campo, a



influência dos fatores da pressão de inflação e da carga sobre o rodado motriz (sob quatro níveis), nas duas condições de tração dianteira

Os mesmos autores concluíram que a pressão de inflação influenciou significativamente nos parâmetros de patinagem, velocidade de deslocamento e potência na barra. O uso da tração dianteira auxiliar –TDA, mostrou vantagens significativas em relação aos mesmos parâmetros anteriores. A interação entre os fatores pressão de inflação e carga sobre o rodado mostrou que determinadas combinações de pressão foram mais favoráveis para o desenvolvimento de maior velocidade e menor patinagem. As características relacionadas ao desempenho do motor (consumo horário de combustível e rotação do motor) não foram afetadas por nenhum dos fatores ou suas interações.

A pressão de inflação tem papel fundamental na área de contato entre o pneu e o solo, além da distribuição de pressão na sua superfície (LEE e KIM, 1997). Esses autores analisaram o efeito da pressão de inflação no desempenho da capacidade tratória de um trator usando pneus diagonais e concluíram que a máxima eficiência de tração foi verificada na velocidade de deslocamento de 5,5 km.h<sup>-1</sup>; entretanto, os autores não puderam afirmar que, com o aumento da velocidade de deslocamento, houve aumento da eficiência de tração. O melhor desempenho dos rodados do trator foi obtido pelo ajuste da pressão de inflação dos pneus de acordo com o tipo de solo e com as condições superficiais deste solo.

Pneus com baixa pressão de inflação tendem a ter maior área de contato com o solo, fornecendo ao trator maior capacidade tratória. Correa et al. (2000) observaram uma tendência de melhoria na capacidade tratória, quando os pneus estavam inflados na pressão recomendada pelo fabricante. Os resultados obtidos pelos autores evidenciaram diferenças expressivas do uso da pressão correta em relação às altas pressões de inflação, com redução de 11,5% na patinagem e de 3,2% no consumo de combustível do trator. Os autores obtiveram ainda um aumento de 3,7% na potência na barra de tração e de 4,4% na capacidade operacional, com o uso da pressão recomendada pelo fabricante de pneus comparado com a pressão baixa em pneus diagonais.

### **3.7 – Influência da pressão de inflação do pneu do trator na resistência do solo a penetração**

A utilização agrícola do solo altera a sua estrutura mecânica, podendo causar a compactação o que não necessariamente restringirá o crescimento e desenvolvimento das culturas. Segundo HAKANSSON & VOORHEES (1998), a verificação dos efeitos da compactação sobre as propriedades do solo pode ser relativamente fácil, mas, a determinação

dos seus efeitos sobre o crescimento das plantas é difícil, devido ao grau de interação entre as características do solo e a dinâmica do meio ambiente.

Conforme SILVA et al. (2004) a utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas tem contribuído para modificar as propriedades físicas e dinâmicas dos solos tendo despertado o interesse dos pesquisadores por estudos de compactação e dinâmica do solo.

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

De acordo com SOANE et al. (1981), tanto a pressão de inflação quanto o tamanho do pneu atuam na distribuição das forças sobre a área de contato com o solo. Já as forças na interface solo-pneu e a resistência apresentada pelo solo influenciam a magnitude e distribuição das tensões no solo sob as rodas.

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

PERDOK & ARTS (1987), em estudo onde correlacionaram as características dos pneus com as propriedades do solo, observaram que a capacidade de carga do pneu é fortemente dependente das suas dimensões, pressão de inflação e tipo (radial ou diagonal).

YANAI et al. (1999) salientam que a pressão de inflação e a carga sobre o rodado motriz, bem como o tipo de construção do rodado, a configuração da banda de rodagem, a superfície e condição do solo, são fatores que afetam o desempenho operacional do trator.

NOVAK et al. (1992) salientam que pressões de contato pneu/solo maiores levam a aumento na densidade do solo, portanto para se evitar a compactação, deve-se trabalhar com pressões de contato menores. HAKANSSON & REEDER (1994) salientam que existem várias técnicas capazes de reduzir a compactação do solo, entretanto sua utilização normalmente é de custo elevado e raramente são capazes de corrigir totalmente os efeitos da compactação. Os autores recomendam ser mais interessante evitar-se a compactação através da minimização do carregamento mecânico sobre o solo, do que periodicamente

descompactá-lo. Salientam ainda que caso sejam aplicadas cargas excessivas após feita descompactação do solo este novamente apresentará compactação subsuperficial.

Uma das várias formas de caracterizar o estado de compactação do solo é a utilização de penetrômetros ou penetrógrafos, que são aparelhos capazes de determinar a resistência mecânica do solo à penetração de uma ponteira cônica. O uso deste aparelho permite a identificação de zonas de maior resistência à penetração e por via de consequência a localização de regiões compactadas de um determinado solo. As medidas da resistência à penetração no solo podem ser mostradas de forma gráfica o que facilita a visualização das possíveis zonas de compactação do solo.

Apesar de certas limitações, usa-se a resistência à penetração do solo para avaliar seu estado de compactação, principalmente em função da facilidade de manuseio do equipamento e rapidez na obtenção dos resultados. Conforme VOORHEES et al. (1978) a resistência à penetração vem a ser um indicador mais sensível do estado de compactação do solo do que a densidade. Os atributos físicos como textura, densidade, porosidade e índice de plasticidade, também apresentam importância para a caracterização do solo e estudo da relação solo-máquina. Atualmente existe uma grande preocupação com a compactação excessiva dos solos, principalmente devido ao elevado tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas. Com isto, objetivou-se avaliar o carregamento oferecido pelo pneu do trator ao solo, quando inflado com diferentes pressões, quantificando-se sua influência no aumento da resistência à penetração e área de contato pneu/solo.

### **3.8 – Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo**

No estado de Mato Grosso onde o mesmo tem participação com 3,8% da produção nacional de cana-de-açúcar, sendo uma das regiões do Brasil que comportam a expansão da atividade devido à grande disponibilidade de terras agricultáveis e clima favorável. A tecnologia de produção tem acompanhado as evoluções, no que se refere à utilização de máquinas e implementos e técnicas de manejo e transporte. Para tanto, faz-se a opção por veículos de maior capacidade unitária de carga, os quais trafegam nas áreas de plantio, provocando a compactação do solo.

Rosolem (1994) observou que a raiz não responde à compactação do solo mas, sim, a resistência do solo a penetração (RSP), da qual a compactação é um dos fatores. A RSP depende da densidade, da umidade e da textura do solo. A impedância física de formação de novas raízes pode prejudicar o desenvolvimento das plantas. Conforme Letey (1985) e

Weaich et al. (1992) a resistência do solo a penetração é um dos atributos físicos do solo que influenciam diretamente o crescimento das raízes e a parte aérea das plantas.

A caracterização da camada compactada e do comportamento do solo em relação às suas propriedades físicas, como densidade, porosidade, umidade e capacidade de retenção e infiltração da água e, principalmente, a localização da camada compactada hardpans, é de extrema significância para o planejamento das técnicas modernas de produção. Devido a esses fatos, o desenvolvimento de sensores que meçam com precisão a compactação e de técnicas que produzam mapas de resistência do solo, é de elevada importância para as operações de preparo e utilização do solo.

Vários são os tipos de penetrógrafos, variando desde os que funcionam por impacto até os mais modernos, constituídos de células de carga e programas computacionais que proporcionam melhor funcionabilidade e precisão nos dados coletados. Para a confecção dos mapas é conveniente entender a natureza da variabilidade espacial do parâmetro e como mapeá-lo. Um dos aspectos mais importantes é a quantidade de dados requerida, de forma que os mesmos possam definir se são contínuos no espaço e qual a natureza desta variabilidade. As análises estatísticas clássicas que sempre trataram os solos como meio homogêneo, estão sendo substituídas por análises que levam em consideração as correlações entre observações vizinhas. Essas análises são possíveis graças aos grandes avanços computacionais de análise e modelagem que agora estão sendo aplicados na pesquisa de engenharia agrônômica. A teoria das variáveis locais, denominada geostatística, é uma ferramenta que possibilita estudar a variabilidade espacial das propriedades do solo.

### **3.9 – Tráfego de máquinas e implementos agrícolas no solo**

A aplicação de cargas dinâmicas por rodados e implementos agrícolas no solo produz tensões na interface solo/pneu e solo/implemento em superfície e profundidade, respectivamente. Essas tensões compactam as diferentes camadas do solo (Horn & Lebert, 1994) e, caso este carregamento dinâmico exceda a resistência interna do solo, mudanças nas propriedades físicas das camadas mais profundas ocorrerão (Horn, 1988).

De acordo com Lowey & Schuler (1994), Alakukku & Elomen (1995) e Ball et al. (1997), a densidade do solo é significativamente elevada após o tráfego de máquinas agrícolas, com redução da macroporosidade e conseqüente diminuição da condutividade hidráulica. Way et al. (1995) verificaram aumento significativo da densidade do solo abaixo da linha de tráfego, sendo esse aumento tanto maior quanto maior o número de carregamentos. Wood et al. (1993) constataram que, antes do preparo, o tráfego de quatro

passadas de uma carreta graneleira provocou decréscimos de até 50 % na porosidade e permeabilidade nas profundidades de 0,20 e 0,40 m, quando comparados com o efeito provocado por uma única passada.

Constatações semelhantes foram feitas por Novak et al. (1992), Bailey et al. (1993), Horn (1994) e Way et al. (1995), segundo os quais repetidas passadas com rodados agrícolas aumentaram a degradação da estrutura do solo em profundidade. Todavia, Fenner (1999), fazendo um estudo de tráfego controlado em solos da Amazônia, verificou que as maiores deformações no solo ocorrem logo após a primeira passagem da máquina, sendo os efeitos das passagens subseqüentes mais reduzidos.

O aumento progressivo das cargas externas, combinadas com a insuflagem inadequada dos rodados, contribui para a degradação das camadas do solo em profundidade, em decorrência do deslizamento causado, geralmente, pelo aumento do cisalhamento na superfície, o que implica o rearranjo das partículas do solo, e, conseqüentemente, alterações da estrutura. A disponibilidade de água e nutrientes é comprometida pela alteração da estrutura do solo, tendo, como conseqüência, um declínio da produtividade (Wiermann et al., 1999; Wiermann et al., 2000).

No Brasil, são poucas as investigações (Jorge, 1986; Novak et al., 1992; Miranda, 2001; Castro Neto, 2001) que têm mostrado o efeito do tráfego contínuo e inadequado de máquinas e, ou, implementos sobre os atributos físicos e mecânicos dos solos agrícolas. Fazendo uma análise dos objetivos e da forma como são realizados trabalhos correlatos, percebe-se que a maioria deles é geralmente feita em uma condição estática e quase sempre voltada à obtenção de um resultado qualitativo e comparativo, cujas variáveis avaliadas são a densidade do solo e a porosidade.

Neste caso, três ponderações podem ser feitas: a primeira é que as operações agrícolas ocorrem de forma dinâmica, a segunda é que a densidade do solo e a porosidade são fortemente dependentes do manejo e a terceira é que quase sempre são desconsideradas informações, tais como o tipo de pneu, pressão de inflação, pressão de contato, umidade do solo, profundidade de trabalho e especificações técnicas dos implementos utilizados.

Todavia, diferentemente da pesquisa nacional, em outros países, os estudos que envolvem a influência do tráfego agrícola no comportamento da estrutura já estão bem avançados. Seus estudos vão desde a quantificação e distribuição da tensão aplicada no solo aos deslocamentos, vertical e horizontal, medidos *in situ* a partir de transdutores, como visto em Olson (1994); Horn (1994); Horn et al. (1998); Wiermann et al. (1999) e Wiermann et al. (2000). Esses estudos levam em consideração a relação tensão-deformação do solo, a qual se

tem mostrado necessária para compreender o processo de compactação dos solos agrícolas (Koolen, 1994; Horn et al., 1998).

## 4 – DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E METODOLOGIAS UTILIZADAS

### 4.1– Características dimensionais do Trator (4 hrs)

Com o intuito de minimizar os efeitos do tráfego dessas máquinas no solo e consequentemente da perda de produção por fatores relacionado a sua compactação , o experimento realizado foi com um trator Valtra 120 cv, equipado com equipado com pneus dianteiros 14.9-24 R1 e traseiro 18.4-34 R1.

Onde o trator foi avaliado pelo Laboratório de investigação de veicular do NUTEC (Figura 7), onde o mesmo obteve a pesagem dos eixos e calibração adequada para o experimento, com relação peso potência de 55 kg cv-1, totalizando 6875 kg, com distribuição de 60% no eixo traseiro e 40% no eixo dianteiro, com lastros sólidos e líquidos.

Figura 7 - Equipamentos do laboratório de investigação veicular (NUTEC)



Fonte – Elaborada pelo próprio autor

#### 4.2– Resistência do solo à penetração (48 hrs)

A Resistência a Penetração (Índice de Cone) é o método mais prático para se mensurar a compactação do solo. Este método consiste em inserir uma ponta cônica e medir a força exercida para penetração. Segundo a norma ASAE S313.3, a Resistência de Penetração é a pressão sobre a área de um cone com ângulo sólido de 30°. Dois padrões de cone são especificados por esta norma (cone tipo 1 e cone tipo 2)

Para se verificar a compactação do solo, utilizou-se o penetrometro pnt 2000 de tipo 2 (Figura 8), onde este aparelho pode ser adaptado com GPS para fazer um georreferenciamento da área de atuação, onde ficaria mais precisa sua coleta de dados de compactação de solo.

Figura 8 – Penetrometro utilizado na área do experimento para realizar as medições dos níveis de compactação.



Fonte – Manual de fabricação do penetrometro pnt2000

O PNT-2000/MOTOR possui um sistema de acionamento elétrico da haste penetradora que facilita e aumenta a precisão das amostragens. Um poderoso motor introduz a haste na terra de forma a manter uma velocidade constante de penetração durante todo o curso da haste. Toda energia necessária para acionar o sistema é proveniente de uma bateria automotivas de 12 volts e também pode ser ligado diretamente à bateria do carro. O controle eletrônico e de aquisição de dados é microporcessado e adquire a compactação do solo a cada 10 mm (programável) transformando esses valores, posteriormente, em um gráfico com a compactação do solo ao longo do comprimento da haste.



### 4.3– Teor de umidade do solo (128 hrs)

Na área do experimento dentro de cada parcela, antes da passagem do trator 4x2 TDA 120 cv, foi coletada uma amostra de solo aos 30 cm de profundidade conforme (Figura 9) e colocada dentro de recipiente (Figura 10) onde a mesma foi pesada por uma balança de precisão de 0,01g (Figura 11) e colocada pra secar em estufa aos 105°C (Figura 12), pelo período de 24hrs, logo depois de secas as amostras foram novamente pesadas para ter a obtenção da umidade do solo, logo em seguida foi feita a passagem dentro das parcelas do experimento do trator 4x2 TDA 120 cv, e novamente foi feita uma nova coleta de amostras onde as mesmas foram pesadas e novamente colocadas para secar em estufa a mesma temperatura de 105°C por 24hrs de onde foi obtida a umidade do solo dentro de cada parcela conforme tabelas 1 e 2.

Figura 9 – Abertura cavada no solo com a profundidade de 30 cm, para a coleta de amostra.



Fonte – Elaborada pelo próprio autor

Figura 10 – Recipiente onde foi armazenada a amostra de solo de cada parcela.



Fonte – Elaborada pelo próprio autor

Figura 11 – Balança de precisão onde foram pesadas todas as amostras de coleta de solo



Fonte – Elaborada pelo próprio autor

Figura 12 – Estufa de secagem de solo, onde foram colocadas para secar as amostras de solo a temperatura de 105°C, para a obtenção da umidade.



Fonte – Elaborada pelo próprio autor

Com o intuito de verificar as possíveis conseqüências do tráfego de máquinas em um Argissolo Vermelho - amarelo, apresentando classe textural franco arenoso, com aproximadamente 10,60% de argila, 82,90% de areia, 6,40% de silte, foi instalado experimento avaliando diferentes números de tráfegos de trator agrícola na área útil da parcela (T1-tráfego um, T2- tráfego dois e T3- tráfego três) em relação a duas pressões de inflação de ar P1 – 12 Psi; P2 – 24 Psi; de um trator agrícola com 120 cv, em 24 parcelas ao acaso.

A área da parcela onde foi realizada a passagem do trator 120 cv, tem 2,5m de largura x 11m de comprimento, conforme abaixo na Figura 13. Onde em todas as parcelas foi realizada uma coleta de dados de compactação do solo, na profundidade de 30 cm com o aparelho penetrometro pnt2000, sendo que foram coletados 30 pontos antes da passada do trator, onde esses pontos coletados foram distribuídos em 10 pontos no centro da linha de passagem dos pneus do lado esquerdo do trator, 10 pontos no centro da parcela, ou seja entre as marcas dos pneus do trator e 10 pontos no centro da linha de passagem dos pneus do lado direito do trator. Contudo também foram coletados dentro de todas as parcelas, com o mesmo aparelho 15 pontos depois da passada do trator. Onde esses pontos foram distribuídos em 5 pontos no centro da linha de passagem dos pneus do lado esquerdo do trator, 5 pontos no centro da parcela, ou seja entre as marcas dos pneus do trator e 5 pontos no centro da linha de passagem dos pneus do lado direito do trator. Depois de feito todo processo foram obtidos, cerca de 1080 pontos onde será feito toda uma análise de dados.

Figura 13 – Área da parcela de rastro do trator onde foi realizada a coleta de dados com o penetrometro.



Fonte – Elaborada pelo próprio autor

## **5 – CONCLUSÃO**

No estágio realizado, foram feitas análises do solo, teor de umidade, resistência do solo a penetração, e estudou-se a compactação do solo mais profundamente, assim conseguimos medir com o penetrometro sua compactação mas devido à queima da placa de memória do penetrômetro e conseqüentemente a perda de todos os dados armazenados na memória do aparelho.

Assim logo que conseguimos recuperar os dados da memória do penetrometro iremos dar a sequência no estágio e assim ter os dados da compactação do solo na área estudada.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 28, p. 519- 531, 2004.
- AGASSI, M.; MORIN, J.; SHAINBERG, I. Effect of raindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 186-190, 1985.
- ALAKUKKU, L. *et al.* Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 145-160, 2003.
- ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.36, p. 141-152, 1994.
- ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variação temporal da estabilidade estrutural em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 24, p. 275-280, 1994.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá-PR, v. 26, p. 27-34, 2004.
- ALVES, M. C. *et al.* Propriedades físicas e infiltração de água de um Latossolo Vermelho Amarelo (Oxi sol) do noroeste do estado de São Paulo, Brasil, sob três condições de uso e manejo. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, Coruña, v. 30, p. 167-180, 2005.
- AMURI, N.; BRYE, K. R. Residue management practice effects on soil penetration resistance in a wheat-soybean double-crop production system. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 173, p. 779-791, 2008.
- ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 319-332, 1991.
- ASHBURNER, J. E.; SIMS, B. G. **Elementos de diseno Del tractor y herramientas de labranza**. San José: IICA, 1984.
- BAILEY, A. C. *et al.* An integrated approach to soil compaction prediction. **Journal Agriculture Engineering Research**, London, v. 61, p.73-80, 1993.
- BALL, B. C. *et al.* Soil structural quality, compaction and land management. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 48, p. 593-601, 1997.
- BAUDER, J. W.; RANDAL, G. W.; SWANN, J. B. Effect of four continuous systems on mechanical impedance of a clay loam soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 4, p. 802-806, 1981.

BARRETO RIQUELME, U. F. **Propriedades físicas e hídricas do solo em sistemas de manejo do feijoeiro**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2004.

BELTRAME, L. F. S.; GONDIM, L. A. P.; TAYLOR, J. C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG, v. 5, p. 145-149, 1981.

BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J. C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 32, p. 59-62, 1980.

BERVALD, C. M. P. **Tecnologia mecanizada em preparo de área sem queima no nordeste paraense**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

BERTOL, I. *et al.* Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG, v. 28, p. 155- 163, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, Botucatu, v. 8, p. 242-249, 2003.

BEUTLER, A.N. *et al.* Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 191-199, 2002.

BEUTLER, A. N. *et al.* Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG, v. 29, p. 843-849, 2005.

BICKI, T. J .; SIEMENS, J. C. Crop responses to wheel traffic soil compaction. **Transactions American Society of Agricultural Engineers**, [S.l], v. 34. p. 909-913, 1991.

BORTOLOZZO, A. R.; SANS, L. M. A. Se lamento superficial e seus efeitos na taxa de infiltração: uma revisão. **Revista Factu Ciência**, Unai, v. 1, n. 1, p.32-42, 2001.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. *In*: SOANE, B. D.; OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264.

BRAIDA, J. A. *et al.* Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG, v. 30, p. 605-614, 2006.

BRANDT, A. A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.



BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions American Society of Agricultural Engineers**, [S.l.], v. 3, p. 519-524, 1990.

BUSSCHER, W. J. *et al.* Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: USP, 1997.

CANARACHE, A. Penetr - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 51-70, 1990.

CARPENEDO, V.; MILENICZUK, J. Estado de agregação e qual idade de agregados de Latossolo Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG, v. 14, p. 99-105, 1990.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 70, p. 425- 433, 1990.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados há dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 156 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Energia na Agricultura, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, SP, 2001.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Sistemas de preparo de solos de cerrado: Efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, p. 315-324, 1992.

CHAMEN, T. *et al.* Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 161-174, 2003.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

COLLARES, G. L. *et al.* Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.

COSTA, F. S. *et al.* Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG, v. 27, p. 527- 535, 2003.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG, v. 23, p. 703-709, 1999.

DIAS JUNIOR, M. S. *et al.* Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 371-380, 1999.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. *In*: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H. V.; CHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1. p. 55-94, 2000.

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

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

FENNER, P. T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira**. 1999. 135 f. Tese (Tese de Livre Docência) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, SP, 1999.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 24, n. 3, p. 487-493, 2000.

GERARD, C.J.; SEXTON, P.; SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 875-879, 1982.

GENRO JUNIOR, S. A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 23, p. 155-164, 1999.

GYSI, M.; OTT, A.; FLÜHLER H. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unplugged sandy loam soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p.141-151, 1999.

GUROVICH, L. A. Field spatial variability structure of soil hydrodynamic properties. **Ciencia e Investigación Agraria**, Santiago, v. 9, p. 243-254, 1982.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 105-120, 1990.

HÅKANSSON, I. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures**. Uppsala: DLU, 2005.

KELLER, T.; TRAUTNER, A.; ARVIDSSON, J. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, p. 39-47, 2002.



HAKANSSON, I. VOORHEES, W. B. Chapter on soil compaction. *In: LAL, R. et al. Methods for assessment of soil degradation*. Boca Raton: CRC, 1998. p. 167-179.

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

HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, [S.l.], v. 116, 77-88, 2003.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Jerusalém, v. 11, p. 53-71, 1988.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. *In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69.

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

KLEIN, V. A. **Propriedades físico- hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 150 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

KOOLEN, A. J. Mechanics of soil compaction. *In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69.

JORGE, J. A. **Compactação do solo: causas, conseqüências e maneiras de evitar a sua ocorrência**. Campinas, SP: Instituto Agrônômico de Campinas, 1986. (Circular Técnica)

LAL, R. **Role of mulching techniques in tropical soil and water management**. Ibadan: International Institute of Tropical Agriculture, 1974. (Technical Bulletin, n. 1).

LAL, R. Soil compaction and tillage effects on soil physical properties of a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 14, p. 53-65, 1999.

LANZANOVA, M. E. **Atributos físicos do solo em sistemas de culturas sob plantio direto na integração lavoura-pecuária**. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

LAWS, J. O. Recent studies in raindrops and erosion. **Agricola Engineering**, v. 21, p.431-433, 1940.

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

LEE, W. J. *et al.* Interactive effects of wheel-traffic and tillage system on soil carbon and nitrogen. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, p. 3027-3043, 1996.

LEE, D. R.; KIM, K. U. Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. **Journal of Terramechanics**, v. 34, n. 03, p. 187-208, 1997.

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

LIBARDI, P. L. *et al.* Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 20, p. 1-12, 1996.

LIMA, C. L. R. Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. 2004. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2002.

LIMA, C. L. R. *et al.* Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 28, p. 945-951, 2004.

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

LIMA, M. R.; SIRTOLI, A. E. **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR, 2006.

LIPIEC, J. *et al.* Soil physical proper ties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 307-317, 1991.

LIPIEC, J.; SIMOTA, C. Role of soil and climate factors in influencing crop responses to soil compaction in Central and Eastern Europe. *In*: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C., **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 365-390.

LOWERY, B.; MORRISON, J. E. Soil penetrometers and penetrability. *In*: DANE, J. H.; TOPP, C. **Methods of soil analysis: Part 4 - Physical methods**. Madison, Soil Science Society of America, 2002. p. 363-388.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 30, p. 163-170, 2006.

MARTINO, D.; SHAYKEWICH, C. F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 74, p. 193-200, 1994.

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

MIRANDA, E. É. V. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na região do cerrado. 2001. 57 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2001.

MONTEIRO, LEONARDO. Desempenho operacional e energético de um trator agrícola em função do tipo de pneu, velocidade de deslocamento, lastragem líquida e condição superficial do solo. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 2008, 69 f. (Tese de mestrado).

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

NOVAK, L. R.; MANTOVANI, E. C.; MARTYN, P. J.; FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico, em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, n. 12, p. 1587-1595, 1992.

OLIVEIRA, G. C. **Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por 20 anos no cerrado**. 2002. 78 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

OLSON, H. J. Calculation of subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, p. 105-111, 1994.

PABIN, J. *et al.* Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.*, 46:203-208, 1998.

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: Como evitá-la. **Agropecuária Catarinense**, v.9, p.50-52, 1996.

PERDOK, U. D.; ARTS, W. B. M. the performance of agricultural tyres in soft soil conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 10, p. 319-330, 1987.

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. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 929-938, 2000.

REICHERT, J. M. *et al.* Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, MG, v. 5, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência&Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

REINERT, D. J.; COLLARES, G. L.; REICHERT, J. M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: Desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 304-316, 2007.

REIS, E. F. *et al.* Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 30, p. 777-786, 2006.

ROQUE, C. G. *et al.* Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá-PR, v. 25, p. 53-57, 2003.

ROSA, D. P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

ROSOLEM, C. A. Interpretação de análise de solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. *In*: SEMINÁRIO SOBRE TECNOLOGIAS DE MANEJO DE SOLO E ADUBAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR, 1., 1994, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: [s.n.], 1994, p. 53-73.

SCHAEFER, C. E. R. *et al.* Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 5, p. 669-678, 2002.

SECCO, D. *et al.* Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 797-804, 2004.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e produtividade das culturas**. 2003. 108 f. Tese (Doutorado em Agronomia)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. 2000. 75 f. Tese (Livre Docência)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

SEVERIANO, E. C. *et al.* Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 1419-1427, 2008.

SILVA, R. B. *et al.* Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 165-173, 2004.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, p. 31-40, 2006.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 313-319, 1997.

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

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soil s. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; VILAS BOAS, J. E. B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de latossolos com diferentes umidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, p. 759-768, 2006.

SILVA, R. B. *et al.* Atributos físicos, mecânicos e dinâmicos do solo como indicadores do impacto do cultivo e do tráfego em perímetros irrigados. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 3, p. 384-401, 2006.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um latossolo vermelho-escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 239-249, 2000.

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

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTS, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 41, n. 1, p. 53-73, 1997.

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

SOANE, B. D.; BLACKWELL, P. S.; DICKSON, J. W. *et al.* Compaction by agricultural vehicles: a review I. Soil and wheel characteristics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, p. 207-237, 1981.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de trans formação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 15, p. 229-235, 1991.

STRECK, C. A. *et al.* Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 34, p. 755-760, 2004.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SUZUKI, L. E. A. S. *et al.* Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, 1159-1167, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 223-232, 1999.

TORRES, E.; ODILON, F. S.; GALERANI, P. R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: Embrapa-CNPSO, 1993. (Circular Técnica, 12).

TWEDORFF, D. A. *et al.* Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, p. 465-471, 1999.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: A review. **Agronomy Journal**, v. 86, p. 759-766, 1994.

VEEN, B. W.; BOONE, F. R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 219-236, 1990.

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

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

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. *In*: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p. 319-344.

WAY, T. R. *et al.* Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. **American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 38, p. 669-674, 1995.

WEAICH, K.; BRISTOW, K. L.; CASS, A. Preemergent shoot growth of maize under different drying conditions. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 56, p. 1272-1278, 1992.

WIERMANN, C. *et al.* Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, p. 127-135, 1999.

WIERMANN, C. *et al.* Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 117-128, 2000.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, p. 285-291, 1951.

WOOD, R. K. *et al.* Soil physical properties as affected grain cart traffic. **American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 36, p. 11-14, 1993.

WU, L.; SWAN, J. B.; PAULSON, W. H.; RANDALL, G. W. Tillage effects on measured soil hydraulic-properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 17-33, 1992.

YANAI, K. *et al.* Desempenho operacional de trator com e sem acionamento da tração dianteira auxiliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 8, p. 1427-34, 1999.

YAVUZCAN, H. G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavariansilty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: Impacts of tillage method and soilwater content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 200-215, 2005.