TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA APLICADA A ESTUDOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS

CARLOS MANOEL PEDRO VAZ
Físico

Orientador: Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queirós", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de concentração: Energia Nuclear na Agricultura.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Novembro - 1989

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Vaz, Carlos Manoel Pedro

V393t Tomografia computadorizada aplicada a estudos de
compactação de solos. Piracicaba, 1989.
110p. ilustr.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Solo - Compactação - Técnica nuclear 2. Solo -
Densidade - Técnica nuclear 3. Solo - Física 4. Tomo-
grafia automatizada aplicada I. Escola Superior de A-
gricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.43

TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA APLICADA A ESTUDOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS

CARLOS MANOEL PEDRO VAZ

Aprovada em: 06.12.1989

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Klaus Reichardt

ESALQ/USP

Prof. Dr. Virgílio Franco do Nascimento Filho

ESALQ/USP

Dr. Silvio Crestana

UAPDIA/EMBRAPA

Prof. Dr. KLAUS REICHARDT
Orientador

Dedico este trabalho

a minha familia

AGRADECIMENTOS

- À UAPDIA-EMBRAPA pela possibilidade da realização deste trabalho, através do apoio financeiro, boa infra-estrutura e recursos humanos.
- Aos pesquisadores e funcionários da UAPDIA/EMBRAPA, pelo apoio dado e amizade.
- Aos pesquisadores, funcionários e alunos da Seção de Física do Solo do CENA/USP, pelo apoio dado e pela ótima convivência.
- Ao Prof. Sérgio Mascarenhas e Paulo Estevão Cruvinel, pelas oportunidades e incentivo.
- Aos eng. Osny Bacchi (CENA/USP) e Rubsmar Stolf (PLANALSUCAR/IAA), pelo constante apoio, incentivo, sugestões e discussão dos resultados.
- Ao PLANALSUCAR/IAA e CENA/USP, pela cooperação científica e apoio na realização deste trabalho.
- Ao Clóvis, Mauro, Colnago, Ladislau Martin, Ladislau Rabello, Herrmann e Wilson, pelo constante incentivo.
- Ao Ricardo Y. Inamasu, pela revisão, sugestões ao texto e amizade.
- Ao Valentim Monzane, pela elaboração das figuras.
- Ao Luiz Ap. Godoy, pelo apoio na área de mecânica.

- Ao sr. Benedito, pela ajuda na construção das trincheiras e coleta de amostras de solo.
- A Janis Ap. Baldovinotti e Vera L.C. Otaviano, pela organização das referências bibliográficas.
- A Ana M. F. Ambrosio e Suzete A. B. do Carmo, pelo auxílio na datilografia.
- De modo bastante especial, agradeço Silvio Crestana e Klaus Reichardt pelas orientações acadêmicas e esforços para que este trabalho fosse realizado.

LISTA DE FIGURAS

	pag
Figura 1. Esquema do sistema solo, do ponto de vista da compactação.....	4
Figura 2. Aplicação do teste de densidade proctor (SILVA et alii, 1986).....	15
Figura 3. Esquema do processo de compactação do solo por veículos e implementos agrícolas, mostrando seus efeitos acumulativos, devido apenas ao implemento a) e a ambos b).....	17
Figura 4. Distribuição das pressões imprimidas por pneus de um veículo na superfície de um solo arenoso rígido (VANDEN BERG & GILL, 1962).....	18
Figura 5. Distribuição de pressões num plano vertical do solo sob uma pressão de 20,3 atm (2,06 MPa) aplicada numa área de 0,2 m (VANDEN BERG et alii, 1957).....	19
Figura 6. Pressões agindo num volume infinitesimal do solo sob uma carga pontual Q.....	19
Figura 7. Espectro das radiações eletromagnéticas.....	25
Figura 8. Representação esquemática do processo de absorção fotoelétrica.....	27

Figura 9. Representação esquemática do processo de espalhamento Compton.....	28
Figura 10. Representação esquemática do processo de produção de pares.....	29
Figura 11. Coeficiente de atenuação em massa, da água em função da energia (JOHNS & LAUGHLIN, 1982).....	31
Figura 12. Diagrama de blocos de um espectrômetro gama monocanal.....	34
Figura 13. Esquema do processo da interação de um fóton gama com um cristal cintilador.....	35
Figura 14. Esquema de funcionamento de uma válvula fotomultiplicadora.....	36
Figura 15. Princípio básico de operação de um tomógrafo de primeira geração na qual medidas de transmissão são acumuladas enquanto o objeto é rodado e transladado entre a fonte e o detector (HENDEE, 1984).....	38
Figura 16. Movimentos de varredura na tomografia computadorizada. A)- Tomógrafo de primeira geração usando um feixe colimado, com movimentos combinados de translação e rotação. B)- Tomógrafo de segunda geração	

com feixe em leque, vários detectores e movimentos combinados de rotação e translação. C)- Tomógrafo de terceira geração usando um feixe em leque, uma série de detectores e apenas movimento de rotação. D)- Tomógrafo de terceira geração usando um feixe em leque, uma série circular de detectores e apenas movimentos de rotação (HENDEE, 1984)..... 39

Figura 17. Representação esquemática da reconstrução com o algoritmo da retroprojeção simples.. 41

Figura 18. Representação dos elementos da imagem de uma seção transversal de um objeto..... 43

Figura 19. Diagrama de blocos do tomógrafo mostrado na foto da figura 20..... 58

Figura 20. Fotografia do tomógrafo computadorizado de raios X e gama de primeira geração, construído na UAPDIA-EMBRAPA em São Carlos..... 58

Figura 21. Procedimento de coleta e medida de amostras indeformadas numa trincheira, utilizando a técnica da tomografia computadorizada..... 60

Figura 22. Relação experimental entre UM e o coeficiente de atenuação linear para

vários materiais.....	61
Figura 23. Amostra para o estudo de camada de solo compactado.....	67
figura 24. Equipamento utilizado na compactação amostras por compressão estática.....	69
Figura 25. Representação esquemática da coleta de amostras, após a passagem de implementos agrícolas no solo.....	69
Figura 26. Representação esquemática da coleta de amostras numa trincheira e medidas com penetrômetro.....	72
Figura 27. Medidas do coeficiente de atenuação linear para amostras de várias densidades em dois solos.....	75
Figura 28. Imagens de uma seção transversal de uma amostra de solo fino peneirado, quando úmido (a) e seco (b).....	76
Figura 29. Partes das matrizes imagens da tomografia mostrada na figura 28 , quando úmida (a) e seca (b) e das matrizes densidade (c) e umidade (d).....	77
Figura 30. Distribuições de frequências dos dados das figuras 29 a) e b), para a amostra úmida (a) e seca (b), respectivamente.....	79

Figura 31. Perfis das UM (a), densidades e umidades (b), relativos às imagens da figura 28.....	80
Figura 32. Correlação entre UM, a densidade (a) e a umidade do solo (b).....	82
Figura 33. Imagens de duas amostras de solo com finas camadas de solo compactado.....	83
Figura 34. Perfis médios de UM, de amostras com finas camadas compactadas (figura 33).....	83
Figura 35. Imagens de amostras de solo LVE-São Carlos, compactadas com vários teores de água.....	85
Figura 36. Gráfico da densidade média final (medida por gravimetria) e a umidade de amostras de solo compactadas por uma pressão de 0,8 MPa.....	86
Figura 37. Processo de compactação com carga constante e várias umidades, evidenciando a máxima compactação.....	86
Figura 38. Quantificação dos perfis, em termos de densidade do solo, de amostras compactadas com várias umidades e pressão de 0,8 MPa...	88
Figura 39. Perfil de densidades numa amostra coletada após a passagem de um sulcador (1a. amostragem).....	89

- Figura 40. Perfil de densidades numa amostra coletada após a passagem de um sulcador (2a. amostragem)..... 91
- Figura 41. Perfil de densidades numa amostra coletada após a passagem de um sulcador (3a. amostragem)..... 91
- Figura 42. Perfil de densidades na trincheira 1 com a TC e impactos por decímetro com penetrômetro, para várias umidades..... 94
- Figura 43. Perfil de densidades na trincheira 2 com a TC e impactos por decímetro com penetrômetro..... 95

LISTA DE TABELAS

pag

Tabela I.	Limites dos diâmetros das partículas nas classificações granulométricas da Sociedade Internacional de Ciência do Solo e do Departamento de Agricultura dos E.U.A.....	11
Tabela II.	Coeficiente de atenuação em massa para vários solos.....	73
Tabela III.	Resultados obtidos por gravimetria para amostras compactadas pelo teste de proctor (máxima compactação).....	84
Tabela IV.	Resultados das quantificações dos perfis de densidade das amostras coletadas após a passagem de um sulcador no solo (2a. amostragem).....	92
Tabela V.	Resultados das quantificações dos perfis de densidade, das amostras coletadas após a passagem de um sulcador no solo (3a. amostragem).....	92

TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA APLICADA A ESTUDOS DE
COMPACTAÇÃO DO SOLO

Autor: CARLOS MANOEL PEDRO VAZ

Orientador: Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

RESUMO

O presente trabalho estuda a compactação do solo, do ponto de vista da mecânica do solo, isto é, medindo as deformações causadas por forças agindo neste.

O equipamento utilizado é um tomógrafo computadorizado de primeira geração que fornece imagens, por transmissão de radiação, de seções transversais de amostras de solo (até aproximadamente 10 cm na configuração utilizada), com precisão de milímetros. Esta imagem é uma matriz de coeficientes de atenuação linear, os quais podem ser correlacionados com a densidade do solo através de uma calibração para cada solo.

O trabalho se divide nos seguintes experimentos: a) experimentos básicos de calibração e resolução do equipamento; b) medidas de finas camadas de solo compactado; c) experimentos de transmissão de pressões no solo por implementos agrícolas; d) modelamento pressão-deformação em amostras de solo confinadas, com vários graus de umidade; e) levantamento de perfis de

densidade, com amostras retiradas numa trincheira, comparando com a técnica do penetrômetro.

De um modo geral, os resultados evidenciaram um erro de medida da densidade e umidade entre 2 e 3% para uma dada imagem, com resolução espacial da imagem igual a 2 mm.

No estudo de finas camadas de solo compactado, foi possível a quantificação de camadas compactadas maiores que 2 mm.

Em experimentos de campo, após a passagem de um sulcador num Latossol Vermelho Escuro, para várias condições de densidade, umidade e peso do implemento, foram obtidos resultados desde praticamente nenhum aumento de densidade no perfil da amostra, até 0,08 g/cm³ da superfície de contato solo-implemento para baixo.

No experimento com amostras coletadas numa trincheira, foi obtida a caracterização de um perfil de densidade com resolução espacial igual a 2 mm, indicando a existência de uma região compactada de 30 cm, com densidade de 1,3 a 1,5 g/cm³. Sondagens com o penetrômetro indicaram uma grande dependência deste com a umidade do solo. Sendo que para solo seco, o perfil do penetrômetro se assemelha muito com o perfil de densidade obtido com a TC.

No estudo do modelamento pressão-deformação

em amostras confinadas, obteve-se uma correlação linear da densidade com a distância da amostra, para uma carga de 0,8 MPa, numa dada umidade.

Por fim, conclui-se que a TC pode ser utilizada na maioria dos problemas de compactação do solo, com um desempenho superior às técnicas tradicionais, tanto em problemas de modelamento pressão-deformação como em problemas de campo.

COMPUTED TOMOGRAPHY SCANNER APPLIED TO SOIL COMPACTION
STUDIES

Author: CARLOS MANOEL PEDRO VAZ

Adviser: Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

SUMMARY

The soil compaction problem was studied using a first generation computed tomography scanner (CT). This apparatus gets images of soil cross sections samples, with resolution of a few millimeters. We performed the following laboratory and field experiments:

- a) Basic experiments of equipment calibrations and resolutions studies.
- b) Measurements of compacted soil thin layers.
- c) Measurements of soil compaction caused by agricultural tools.
- d) Stress-strain modelling in confined soil sample, with several moisture degree.
- e) Characterizations of soil bulk density profile with samples collected in a hole (trench), comparing with a cone penetrometer technique.

The results showed errors in soil bulk density and moisture content around 2% and 3%, for an image with 2 mm of spacial resolution.

In compacted soil thin layer studies, was possible identified layers grater than 2 mm.

Experiments of compacted soil caused by agricultural tools provided results since zero up to 0,08 g/cm³ of soil bulk density increase, in the sample profile.

In the experiment with samples collected in a trench, the results shown a compacted region of 30 cm between 1,3 to 1,5 g/cm³. Measurements with cone penetrometer showed a close dependence with soil moisture content. For dry soils, the cone penetrometer profile was very similar to the soil bulk density profile measured by CT.

Stress-strain modelling studies with confined samples, provided an approximatly linear correlation between soil bulk density and sample length, for 0,8 MPa preassure, for a constant moisture content.

Finally, we conclude that the CT can be used in the study of soil compaction problems, with better performance than the traditional techniques.

SUMARIO

Página

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
SUMMARY	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. ASPECTOS TEÓRICOS	10
2.1. Descrição do objeto solo	10
2.2. Compactação do solo	13
2.3. Interação dos raios-X ou gama com a matéria	24
2.4. Atenuação de um feixe de raios-x ou gama	30
2.5. Espectrometria gama	33
2.6. Tomografia computadorizada	37
3. REVISÃO DE LITERATURA	45
3.1. Tomografia computadorizada	45
3.2. Métodos de medidas da compactação do solo	50
4. MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1. Atenuação de um feixe de raios gama ...	63
4.1.1. Medidas do coef. de atenuação em massa de solos	63
4.1.2. Coef. de atenuação linear e densidade do solo	64
4.2. Tomografia : calibração e quantificação	64

4.2.1. Relação entre UM e Ds	65
4.2.2. Relação entre UM e Θ	66
4.3. Estudo da compactação de solos por tomografia	66
4.3.1. Finas camadas de solo compactado (laboratório)	66
4.3.2. Compactação por compressão (laboratório)	68
4.3.3. Compactação por compressão de implementos	70
4.3.4. Tomografia vs Penetrômetro (campo)	71
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.1. Atenuação de um feixe de raios gama	68
5.1.1. Medidas do coef. de atenuação em massa de solos	73
5.1.2. Coef. de atenuação linear e do solo	74
5.2. Tomografia : calibração e quantificação	75
5.2.1. Relação entre UM, Ds e Θ	81
5.3. Estudo da compactação de solos por tomografia	81
5.3.1. Finas camadas de solo compactado (laboratório)	81
5.3.2. Compactação por compressão (laboratório)	84
5.3.3. Compactação por compressão de implementos	88

5.3.4. Tomografia vs penetrômetro	
(campo)	93
6. CONCLUSÃO	96
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	100
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	102

1. INTRODUÇÃO

O incremento da demanda de alimentos pelos povos e o grande desenvolvimento industrial contribuíram para uma mudança radical do sistema agrário, passando do uso de tração animal e humana para o uso de maquinários, usados no preparo do solo, plantio, adubação e colheita.

Segundo MCKIBBEN (1971), entre 1948 e 1968 houve um aumento médio de 2,7 ton para 4,5 ton na massa de tratores e nesta década, segundo GAMEDA et alii (1985), a média está em torno de 6,8 ton, com alguns modelos alcançando 22,4 ton.

Associado ainda com um aumento de potência e velocidade, em algumas culturas, os solos expostos a uma extensiva mecanização tendem a apresentarem problemas sérios de compactação (GAMEDA et alii, 1985).

Além das características e forma de utilização dos maquinários, a compactação do solo dependerá de características e propriedades do solo, tais como a granulometria, estrutura, agregados, relevo, dureza, plasticidade, umidade e a densidade deste.

A compactação dos solos devido à maquinários agrícolas, tem efeito acumulativo. Portanto, após vários anos de manejo numa determinada cultura, poderá surgir uma compactação que afetará a dinâmica da água, como mostram LIBARDI et alii (1982) e a dinâmica dos solutos, observados por LANDINA & KLEVENSK (1984), além de aumentar a obstrução do desenvolvimento radicular e provocar uma má aeração deste solo.

Um caso típico da problemática da compactação, segundo FERNANDES (1979), é o da cultura de cana de açúcar, devido ao seu alto grau de mecanização. O uso de maquinários pesados, principalmente no preparo e na colheita, pode levar um solo a altos níveis de compactação, que sem dúvida afetam a produtividade. Tradicionalmente após a cana-planta várias produções de cana-soca são colhidas, sendo sua produção quase sempre decrescente. Estima-se que cerca de 10 a 20% da produção seja perdida devido ao problema da compactação. Por isso depois de um certo número de socas, o canavial é renovado e dependendo do grau de compactação recomenda-se operações pesadas, tais como aração profunda ou subsolagem.

Em outras culturas, em certas condições de solo e manejo agrícola, o problema da compactação também é importante. Nos cerrados, problemas semelhantes são citados pelo CPAC-EMBRAPA no seu noticiário COMPACTAÇÃO (1985). Entre os efeitos nocivos da compactação são ressaltados a diminuição da altura das plantas, sintomas

de deficiências nutricionais, susceptibilidade a períodos secos de curta duração, formação de camada impermeável, dificultando a infiltração da água e facilitando a erosão, e dificuldade para o desenvolvimento vertical das raízes.

Observação similar à do CPAC também foi realizada na Universidade de Purdue nos E.U.A por STEINHARDT (1983) a partir da pesquisa iniciada para identificar os efeitos da compactação de superfície no desenvolvimento e na produção de milho cultivado após a soja. Um experimento foi feito, passando-se um trator 16 vezes em uma parcela da área total a ser cultivada. Após esta operação as parcelas foram aradas, gradeadas e semeadas. As parcelas compactadas, comparadas com as outras não compactadas, mostraram uma redução na altura da planta de 20 a 30%, levando a uma diferença de 1883 kg/ha na produção final. Os solos compactados produziram 8161 kg/ha e os não compactados 10044 kg/ha.

Esses dados ilustram bem a importância de se estudar e compreender bem o fenômeno da compactação do solo.

A compactação do solo é o resultado da aproximação de suas partículas por forças externas ou internas, provocando uma diminuição de sua porosidade. Compreender bem este fenômeno significa entendê-lo como um sistema que relacione a variação da densidade atribuída à compactação com fatores externos (força, umidade) e com as características do solo (granulometria, porosidade,

resistência e outros), do implemento (tipo de material, ângulo de ataque e outros) e forma de utilização deste.

Um entendimento completo do sistema solo, do ponto de vista da compactação (figura 1) é importante, pois deste modo pode-se projetar equipamentos e buscar técnicas de manejo que minimizem o problema da compactação. No entanto, um modelo completo ainda está bem longe de ser obtido devido à complexidade do sistema.

Figura 1. Esquema do sistema solo, do ponto de vista da compactação.

A compactação pode ser medida pelo aumento da densidade ou diminuição da porosidade num solo. Os métodos mais comuns de medida da densidade do solo são os métodos gravimétricos e atenuação de um feixe de raios gama, descritos com detalhes no item 3.2. Abaixo são feitos alguns comentários das vantagens e desvantagens dos principais métodos de estudo da compactação do solo.

Métodos gravimétricos são usados para o cálculo da densidade, pela medida da massa e volume de uma

amostra de solo. A desvantagem na utilização desta técnica é que ela fornece uma média numa amostra de vários centímetros, ou seja, a resolução num perfil é baixa. Para amostras coletadas com amostradores, geralmente ocorre problemas de deformação ou compactação.

A atenuação de um feixe de raios gama é uma técnica que permite uma medida da densidade com boa precisão. O maior problema é que é necessário a medida da espessura da amostra, e portanto, esta necessita de formas regulares. Erros nas medidas dessas espessuras são as maiores fontes de erros desta técnica. Utilizando-se amostradores de volumes (e portanto espessuras) conhecidos, volta-se ao problema da compactação da amostra.

Outro método muito difundido em estudos de compactação de solos é o Penetrômetro, que consiste de uma haste de metal com um cone em uma das pontas e uma carga móvel. Soltando esta carga sempre de uma mesma altura mede-se a penetração desta haste. Regiões compactadas oferecem maior resistência à penetração. Os problemas desta técnica são vários, pois ela não quantifica o perfil em termos de densidade e a penetração está intimamente relacionada com a umidade no perfil. No entanto, das técnicas citadas é a menos trabalhosa e bastante rápida possibilitando uma boa caracterização de uma área.

São muito utilizados também em estudos de

compactação do solo os transdutores de pressão ("strain-gage"), que medem a distribuição das pressões aplicadas no solo. Este método é muito útil em estudos da compactação do solo, mas não fornece a distribuição das deformações (variações na densidade) ocorridas neste.

Uma técnica alternativa bastante recente de medida da densidade (e umidade) do solo é a Tomografia Computadorizada (PETROVIC et alii, 1982; HAINSWORTH & AYLMORE, 1983 e CRESTANA, 1985). Esta técnica tal como a transmissão de um feixe de raios-gama é baseada no princípio da atenuação da radiação X ou gama pela matéria, tendo a vantagem de não necessitar da medida da espessura da amostra e fornecer um mapa quase pontual (bi ou tri dimensional) da distribuição de densidades no interior da amostra. Deste modo é possível se determinar heterogeneidades no interior da amostra.

Segundo ANDERSON et alii (1988), recentes avanços na instrumentação empregada na tomografia proporcionaram o desenvolvimento da tomografia computadorizada (TC) para rápidas análises bi ou tri-dimensionais não destrutivas em tecidos biológicos. No entanto, as aplicações da TC não se limitaram apenas ao campo da medicina. HOPKINS et alii (1981) mostrou que a TC poderia ser utilizada para análise de plástico, madeira, concreto, aço e componentes eletrônicos. ONOE et alii (1983) ilustrou o uso de um tomógrafo portátil para medida de anéis de crescimento de árvores vivas. Na área

da ciência do solo, vários pesquisadores (PETROVIC et alii, 1982; HAINSWORTH & AYLMOORE, 1983; CRESTANA et alii, 1985) introduziram e utilizaram a TC para estudos em física do solo.

A introdução desta técnica, no estudo da compactação do solo, irá proporcionar um grande avanço no conhecimento dos processos de pressão-deformação, possibilitando a medida espacial das deformações em pequenos volumes, o que até o presente momento era impossível, usando técnicas tradicionais, como será mostrado nos aspectos teóricos da compactação do solo no capítulo 2.

O objetivo deste trabalho é justamente desenvolver as metodologias para as possíveis aplicações da TC em diversos problemas práticos de compactação de solos e modelamentos dos processos de pressão-deformação.

Nesta técnica as amostras não necessitam de uma forma regular, ou seja, pode-se analisar torrões indeformados. Sendo também uma técnica bastante sensível (PETROVIC et alii, 1982, obteve uma precisão para variações de densidades de $0,02 \text{ g/cm}^3$) e de alta resolução (comparada com as técnicas convencionais), parece ser ótima para o estudo de variações de densidade no solo.

Neste trabalho é desenvolvida a metodologia para a medida da densidade e umidade de amostras de solo de maneira a caracterizar localmente, distribuições de

compactação num solo submetido a uma pressão usando a tomografia computadorizada. Deste modo faz-se a utilização de uma técnica bastante avançada, reconhecidamente poderosa no estudo de parâmetros físicos do solo como a densidade e a umidade (CRESTANA et alii, 1988) num problema extremamente importante que é a compactação de solos (COMPACTAÇÃO, 1985).

O trabalho estuda alguns problemas de compactação de solos encontrados em diversas situações naturais ou artificiais, que são:

a) Estudo de finas camadas de solo compactado num perfil : Este problema ocorre devido aos processos naturais do intemperismo durante a formação do solo, ou migração de argilas para uma certa região do perfil, causado geralmente por manejo indevido do solo. Para esse experimento são feitas amostras com finas camadas de solo compactado envolvidas por solo não compactado em recipientes de acrílico. Essas amostras são analisadas com a TC de modo que se possa mostrar a aplicabilidade ou não desta técnica em problemas reais de tal natureza.

b) Compactação por compressão de implementos agrícolas e compressão de amostras de solo confinadas variando com a umidade: Amostras de solo são coletadas num sulco após a passagem de um sulcador de modo a caracterizar a deformação causada pela compressão do

implemento no perfil. Em laboratório são utilizadas amostras de solo confinadas em recipientes de acrílico para serem compactadas por uma pressão estática com vários graus de umidades. Essas amostras são analisadas com a TC de modo a se caracterizar espacialmente a deformação imprimida no solo.

c) Caracterização detalhada de um perfil de densidades: Torrões de solo são retirados de uma trincheira num perfil vertical até 70 cm e analisados pela TC para a caracterização deste perfil de densidades e identificação de eventuais regiões compactadas. Este perfil é comparado com medidas feitas com a técnica do penetrômetro para várias umidades.

Para esses experimentos são estabelecidos os procedimentos de preparo de amostras deformadas, coleta de amostras em campo e análise de amostras pela técnica da tomografia.

Por fim, deve-se levar em conta algumas desvantagens na utilização da TC, que são os altos custos dos equipamentos e a impossibilidade da medida no próprio campo. No entanto, alguns avanços tem sido obtidos no sentido de se construir equipamentos simples (CRESTANA et alii, 1986; CRUVINEL, 1987), com custo sensivelmente diminuído, como é o caso do tomógrafo utilizado neste trabalho. Quanto ao problema do transporte das amostras ao laboratório, permanece ainda sem solução.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

A seguir são feitas descrições dos aspectos teóricos ou conhecimento básico para elaboração deste trabalho, que são : o solo, que é o objeto estudado, a compactação do solo, que é o problema abordado, a espectrometria gama, interação da radiação com a matéria e tomografia computadorizada, que dão suporte ao entendimento e descrição da metodologia utilizada.

2.1. Descrição do objeto solo

O solo é formado pela ação do clima e organismos atuando no material de origem, ao decorrer do tempo e dependendo ainda do relevo, sendo que todos os fatores atuam dependentemente.

Uma definição do solo (MARCOS, 1982), com duas condições necessárias e suficientes para identificá-lo dentre os objetos da natureza é: "O solo é a parte superior do regolito, que cria condições que permitem que as plantas nele cresçam". Onde o regolito é a parte superficial que recobre a rocha consolidada e que resulta da ação e combinação dos processos químicos, físicos e biológicos do intemperismo.

Como resultado desses processos de intemperização, o solo é constituído de partículas dos mais variados tamanhos e natureza.

As partículas do solo são classificadas quanto ao tamanho em três classes distintas: argila, silte e areia. O termo tamanho é definido como sendo o diâmetro da esfera contida no maior comprimento da partícula.

A tabela I apresenta os limites das classificações da Sociedade Internacional de Ciência do Solo (SICS) e do Depto. de Agricultura dos E.U.A. (DAEUA).

Tabela I. Limites dos diâmetros das partículas nas classificações granulométricas da Sociedade Internacional de Ciência do Solo e do Departamento de Agricultura dos E.U.A.

DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS (mm)		TIPO DE PARTÍCULA
SICS	DAEUA	
$d < 0,002$	$d < 0,002$	ARGILA
$0,002 < d < 0,02$	$0,002 < d < 0,05$	LIMO
	$0,05 < d < 0,1$	AREIA MUITO FINA
$0,02 < d < 0,2$	$0,1 < d < 0,25$	AREIA FINA
	$0,25 < d < 0,5$	AREIA MEDIA
$0,2 < d < 2,0$	$0,5 < d < 1,0$	AREIA GROSSA
	$1,0 < d < 2,0$	AREIA MUITO GROSSA
$d > 2,0$	$d > 2,0$	CASCALHO

Essas partículas podem, por meio de agentes cimentantes, se agruparem, formando agregados. A disposição de partículas e agregados, decorrentes dos processos citados anteriormente, define a estrutura do solo, ou seja, a disposição espacial dos componentes do sistema, uns com relação aos outros. A existência de partículas de tamanhos e formas das mais diversas dão à estrutura uma dificuldade muito grande de ser quantificada, a não ser uma descrição meramente morfológica.

Outro termo bastante utilizado para auxiliar na classificação de um solo é a textura, que nada mais é que uma classificação ou denominação do solo com relação às porcentagens de argila, silte e areia.

Aqui assume-se solo como a matriz sólida, composta pelas partículas, agentes cimentantes (matéria orgânica e óxidos) e os poros (espaços vazios entre as partículas e entre os agregados). Portanto a água e o ar são fatores externos ao solo, que competem pelo preenchimento do espaço poroso.

Parâmetros físicos macroscópicos são importantes no estudo das propriedades do solo. Entre eles podemos citar:

DENSIDADE DO SOLO (D_s): É a massa total de solo (M_s) dividida pelo volume dos sólidos mais o volume de poros, ou seja, volume total do solo (V_s): $D_s = M_s/V_s$

OBS.: No caso, a massa das partículas (M_p) é igual à massa do solo (M_s).

UMIDADE OU TEOR DE ÁGUA NO SOLO: Pode ser expresso à base de massa e à base de volume de água:

Massa (u): massa de água (M_a), dividida pela massa de solo: $u = M_a/M_s$

Volume (θ): volume de água (V_a) dividido pelo volume total do solo: $\theta = V_a/V_s$

OBS.: $\theta = u.D_s$

POROSIDADE DO SOLO (α): volume de poros ($V_{po} = V_s - V_p$) dividido pelo volume total do solo (V_s): $\alpha = V_{po}/V_s$

Uma relação importante entre a porosidade total, a densidade do solo e a densidade das partículas é:

$$\alpha = 1 - \frac{D_s}{D_p} \dots\dots\dots(1)$$

Desta última relação acima, observa-se que a densidade do solo está intimamente relacionada com a sua porosidade.

2.2. Compactação do solo

Segundo BACCHI (1976) a compactação de solos agrícolas pode parecer de fácil conceituação se for considerado apenas o aspecto físico, como se faz em estudos de mecânica de solos. Entretanto o problema é

mais complexo, envolvendo aspectos físicos, químicos e biológicos, bem como fatores climatológicos e de manejo.

Apesar do grande número de trabalhos publicados a respeito do problema, há deficiências de informações, em relação aos seguintes aspectos:

- a) Conhecimento das características do solo e dos fatores externos que influenciam o fenômeno da compactação do solo;
- b) Os danos causados aos processos dinâmicos que ocorrem no solo e nos espaços porosos tais como: a movimentação de água, gases, íons e calor;
- c) Resposta das plantas devido ao fenômeno da compactação.

Uma mudança no volume de um solo implica na mudança do estado de compactação deste. Esta mudança é causada por forças, que são classificadas em duas categorias: internas e externas. Forças internas são aquelas originadas dentro do solo. Congelamento, secamento e molhamento são fontes de forças internas.

A maioria das forças externas são mecânicas e relativamente fáceis de serem identificadas e medidas. Por outro lado, a maioria das forças internas são difíceis de se identificar e medir.

De um modo geral, a intensidade da compactação depende dos seguintes fatores: Granulometria

(ou textura), tipo de mineral de argila, quantidade de matéria orgânica, grau de agregação, distribuição de poros, densidade e umidade do solo. Depende ainda do tipo e forma de aplicação da pressão no solo.

A influência da umidade é determinada através de um teste padrão desenvolvido para amostras deformadas, conhecido como teste de densidade Proctor. A figura 2 mostra um exemplo da aplicação deste teste. Esta relação mostra que a compactação do solo aumenta com o acréscimo da umidade até um determinado valor, na qual a densidade começa a decrescer.

Figura 2. Aplicação do teste de densidade proctor (SILVA et alii, 1986).

Os outros parâmetros do solo mencionados, influenciam a compactação através da ação e reação às forças aplicadas. Por exemplo, um solo cujas partículas estão bastante agregadas por agentes cimentantes é menos susceptível à compactação que um outro menos agregado.

Como as partículas do solo, água e o ar são relativamente incompressíveis, sob a ação de cargas geralmente aplicadas no solo, a mudança no estado de compactação depende do movimento desses componentes.

A mudança de volume é portanto, dependente do deslocamento das partículas, para um solo insaturado. Para solo saturado depende também de como a água escoar no interior deste, para uma dada carga.

Veículos e maquinários agrícolas causam uma compactação, ou seja, um aumento da densidade (ou diminuição da porosidade) do solo, da superfície para o subsolo, num gradiente negativo. No entanto, o processo de preparo do solo para cultivo, resulta num estado menos denso da camada agricultável. Abaixo desta camada, ou seja, abaixo da base da passagem do implemento, o problema persiste e dependendo do coeficiente de fricção (ou adesão) na interface de deslizamento solo-implemento, ângulo de corte, velocidade e outros, o problema pode se agravar. A figura 3 exemplifica este processo de compactação localizada, o qual pode gerar o chamado pé de arado ou soleira.

Figura 3. Esquema do processo de compactação do solo por veículos e implementos agrícolas, mostrando seus efeitos acumulativos, devido apenas ao implemento a) e a ambos b).

A seguir é feita uma descrição de como as pressões imprimidas na superfície de um solo são transmitidas para o interior deste provocando deformações e as equações utilizadas para descrever tal processo.

Inicialmente as pressões (força por unidade de área) são imprimidas na superfície do solo e então transmitidas no interior deste. A figura 4 mostra como ocorre a distribuição de pressões numa superfície rígida de um solo arenoso, por pneus lisos, nos quais foram acoplados transdutores de pressão ("strain gage").

Figura 4. Distribuição das pressões imprimidas por pneus de um veículo na superfície de um solo arenoso rígido (Vander Berg & Gill, 1962).

De um modo geral essa distribuição mostrada, varia com a pressão no interior do pneu, peso do veículo, número de pneus e área de contato destes.

As distribuições de pressões no interior de um solo sob carga, podem ser obtidas experimentalmente, introduzindo transdutores de pressão no interior deste.

O lugar geométrico de pontos de igual pressão em qualquer profundidade é uma superfície de revolução. É possível traçar deste modo, uma superfície de mesmas pressões (isóbaras) projetada num plano vertical, a qual é chamada de bulbo de pressão. A figura 5 mostra um conjunto de bulbos de pressões obtidos experimentalmente.

A distribuição de pressões num solo pode

também ser estimada, utilizando a teoria matemática da elasticidade. No entanto, algumas aproximações e considerações devem ser assumidas e mesmo assim, devido à grande variedade de solos e processos, nem sempre essa teoria descreve bem a distribuição das pressões num solo sujeito a uma carga.

Figura 5. Distribuição de pressões num plano vertical do solo sob uma pressão de 20,3 atm (2,06 MPa) aplicada numa área de 0,2 m² (Vander Berg et alii, 1957)

Figura 6. Pressões agindo num volume infinitesimal do solo sob uma carga pontual Q .

Boussinesq foi o primeiro a obter uma solução da distribuição de pressões num meio semi infinito, elástico, homogêneo e isotrópico, que segue a lei de Hooke (COHRON, 1971). Boussinesq obteve as seguintes relações:

$$\sigma_z = \frac{3.Q}{2.\pi.Z^2} \cdot \cos^5 \theta \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_x = \frac{Q}{2.\pi.R^2} \cdot 3.\cos\theta.\sin^2\theta - \frac{m-2}{m} \cdot \frac{1}{1+\cos\theta} \dots\dots(3)$$

$$\tau = \frac{3Q}{2.\pi.R^2} \cdot \cos^2\theta \cdot \sin \theta \dots\dots\dots(4)$$

onde $m=1/p$ (p =coeficiente de Poisson ou coeficiente de compressibilidade, o qual depende do tipo de solo - ver BARATA, 1984), σ_z e σ_x são as pressões verticais e horizontais num elemento de volume, τ a tensão de cisalhamento, Q a força aplicada, R a distância entre o ponto de aplicação da força e o elemento de volume do solo. Todos esses parâmetros e ainda mais θ , x e z são esquematizados na figura 6.

Segundo BARATA (1984), em geral, solos se afastam das condições ideais de validade da teoria de Boussinesq, pois não são materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos. No entanto, a teoria é considerada razoável, observadas as seguintes condições:

a) Não pode haver rachaduras no interior do solo;

b) A resistência ou módulo de deformação, deve ser constante na profundidade. Este aspecto é mais real para solos argilosos;

c) Para solos muito heterogêneos, usa-se uma correção estabelecida por Burmister (ver BARROS, 1966);

d) A solução de Boussinesq é válida para carga concentrada, o que equivale a dizer que a teoria só se aplica para profundidades razoavelmente grandes. Para profundidades menores deve-se utilizar cargas aplicadas numa área e não mais pontual.

Tendo em vista as limitações da teoria de Boussinesq, Fröhlich introduziu um fator de concentração ν , pois de observações experimentais, notou-se que haviam maiores concentrações de pressões em torno da vertical do eixo de aplicação da carga. Quanto maior o valor de ν , maior a concentração de pressões, no eixo vertical. Fröhlich obteve as seguintes expressões:

$$\sigma_z = \frac{\nu \cdot Q}{2 \cdot Z^2} \cdot (\cos \theta)^{\nu+2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_x = \frac{\nu \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot (\cos \theta)^{\nu-2} \cdot \text{sen} \theta \dots\dots\dots (6)$$

$$\tau = \frac{\nu \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot (\cos \theta)^{\nu-1} \cdot \text{sen} \theta \dots\dots\dots (7)$$

Segundo SOEHNE (1958), $\nu = 3$ para solos homogêneos, isotrópicos, com comportamento elástico. Para

solos não homogêneos e comportamento não só elástico, mas um tanto plástico, ν varia entre 4 e 6. O fator de concentração ideal, deve ser obtido experimentalmente.

Além dessas soluções, existem outras, onde cada qual se adapta melhor ou pior a determinados tipos de solos e condições específicas de compactações. BARATA (1984) apresenta algumas outras soluções de distribuições de pressões e cálculos de deformações de solos. Também NOGUEIRA (1988) apresenta uma revisão dos principais métodos de estudo das transmissões das pressões em solos.

Embora grande avanço tenha sido obtido na descrição das transmissões das pressões no solo, usando a teoria da elasticidade, as equações descritas não evidenciam a variação de volume, isto é, a variação de densidade ou porosidade.

Para suprir esta deficiência, muitas equações empíricas foram desenvolvidas, relacionando a pressão com a deformação do solo. A eq. (8) mostra uma dessas relações (HARRIS, 1971):

$$e = e_0 - c \cdot \log (P/P_0) \dots\dots\dots(8)$$

onde e_0 é a relação de vazios (volume de vazios/volume de sólidos) na pressão inicial P_0 , c o coeficiente angular num gráfico semi logaritimico e P a pressão aplicada.

Para estudos de resistência à compactação de solo perturbado e confinado, REAVES & NICHOLS (1955)

encontraram a seguinte relação :

$$P = a \cdot e^{b \cdot z} \dots\dots\dots(9)$$

onde a e b são constantes que dependem de parâmetros do solo, P é a pressão aplicada e Z o eixo normal à superfície.

HOVANESIAN & BUCHELE (1959) encontraram para uma massa finita de solo, que a densidade Ds se relaciona com a pressão σ pela fórmula geral :

$$D_s = D_{s_0} + B \cdot \ln \frac{(\sigma/\sigma_0 + C)}{1 + C} \dots\dots\dots(10)$$

onde B e C são constantes, Ds é a densidade inicial sob condição de carga inicial σ_0 e Ds a densidade sob condição de carga σ .

Desses e outros resultados empiricos, conclui-se que a relação entre a carga externa aplicada e o volume de vazios não é linear, mas sim logaritimica ou exponencial. Nas constantes das eq. (8), (9) e (10) estão embutidas as propriedades do solo e a forma de se compactar este solo.

Associando as equações empiricas citadas acima, com as equações de Fröhlich (que mais se aproxima das condições reais do solo), é possível obter uma expressão semi empirica, que relaciona a variação de densidade, com a pressão aplicada neste.

GUPTA et alii (1985) obteve uma expressão experimental (eq.11), semelhante à eq. (10):

$$Ds = [Ds_0 + x(S_1 - S_0) + C \cdot \log (\sigma_z/\sigma_0)] \dots\dots\dots(11)$$

onde Ds é a densidade calculada, Ds_0 a densidade numa pressão conhecida σ_0 , σ_z a pressão normal aplicada, C uma constante, x a tangente à curva de saturação (densidade vs umidade) para uma pressão σ_0 aplicada, S_0 o grau de saturação correspondente à Ds_0 e S_1 o grau de saturação utilizado.

Associando a eq. de Fröhlich, com a eq. (11), Gupta obteve um modelo para o cálculo da densidade de um solo sob carga, no qual a diferença entre valores medidos e calculados variaram de 0,1 a 0,3 g/cm³.

2.3. Interação da radiação gama com a matéria

A radiação gama é uma onda eletromagnética. Sua energia (E) vale: $E = h \cdot \nu$, onde ν é a frequência e h a constante de Planck ($6,6625 \times 10^{-27}$ erg.s) e seu momento (p) vale: $p = h \cdot \nu / c$. Temos ainda que $C = h \cdot \nu$ onde λ é o comprimento de onda e c a velocidade da luz. A figura 7 localiza esta radiação no espectro das radiações eletromagnéticas.

Quando por algum processo natural ou artificial, há um desarranjo na estrutura do núcleo de um átomo, este núcleo se torna excitado. Na volta à uma

Figura 7. Espectro das radiações eletromagnéticas.

configuração estável ocorre processos de desexcitações nucleares. Um desses processos é chamado de desexcitação gama, ou seja, a emissão de radiação gama pelo núcleo. Essa desexcitação é secundária, pois só ocorre após algum outro processo, como a emissão de partículas α , β^+ , β^- , a captura eletrônica e outros.

A energia da radiação gama possui um valor único, ou seja, é monoenergética, vai desde algumas dezenas de keV até alguns MeV.

Por ser radiação eletromagnética de energia relativamente alta, os raios gama tem alto poder de penetração num meio, se comparado com partículas α , β^+ , β^- . No entanto o poder de ionização dos raios gama é muito menor que o das referidas partículas.

Na interação da radiação gama (fótons) com a matéria de um meio, vários fenômenos de transferência de energia podem ocorrer. Os processos de interação da radiação com a matéria dependem da sua energia e do número

atômico do material. Fótons de baixa energia podem interagir somente com os elétrons mais externos do átomo. Fótons de energia maior, podem interagir com elétrons fortemente ligados e finalmente fótons de altíssima energia, interagem nos campos dos núcleos dos átomos. Os principais processos de interação são: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares. O espalhamento Rayleigh a exemplo de outros também presentes nos processos de interação da radiação com a matéria tem contribuição desprezível no caso que estamos estudando. Segue-se então uma breve descrição desses processos (mais detalhes podem ser encontrados em JOHNS & LAUGHLIN, 1982):

a) Efeito fotoelétrico

Fótons de baixa energia podem interagir com a matéria por efeito de colisão direta entre fótons e um dos elétrons. O elétron ejetado do átomo é chamado fotoelêtron. A energia cinética (T_e) do elétron ejetado é dada por $T_e = E - E_L$ onde E é a energia do fóton e E_L a energia de ligação do elétron (figura 8). Como o elétron caminha pouco num meio, ele transfere toda sua energia a este meio e diz-se que pelo efeito fotoelétrico toda energia é transferida para o meio.

O processo somente ocorre se $E > E_L$. Quando há fótons de baixa energia as interações ocorrem com elétrons mais externos. Com um incremento da energia as interações começam a ocorrer com elétrons mais

fortemente ligados, até quando E for maior que E_K (energia de ligação da camada K). Assim todos os elétrons podem tomar parte do processo fotoelétrico. No entanto, pode-se mostrar que o processo ocorre mais comumente com um dado elétron quando a energia do fóton é levemente maior que a de ligação do elétron. Não há ocorrência de efeito fotoelétrico para um elétron livre.

Figura 8. Representação esquemática do processo de absorção fotoelétrica.

A ocorrência do processo de absorção fotoelétrica aumenta com o incremento do número atômico do absorvedor e diminui com o aumento da energia da radiação.

b) Efeito Compton

Este processo é uma colisão elástica entre um fóton e um elétron que está essencialmente livre, ou seja, a energia do fóton é muito maior que a energia de ligação do elétron no átomo.

Figura 9. Representação esquemática do processo de espalhamento Compton.

O fóton incidente de energia E , colide com um elétron considerado inicialmente em repouso. O elétron é espalhado com energia T_e , fazendo um ângulo com a direção do fóton incidente. O fóton espalhado tem a energia reduzida a E' e é espalhado de um ângulo Φ com a direção do fóton incidente, como mostra a figura 9.

De acordo com a lei de conservação da energia e do momento, tem-se que:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 \cdot c^2} (1 - \cos\theta)} \dots\dots\dots(12)$$

onde m_0 é a massa de repouso do elétron.

A energia do elétron ejetado é dado por:

$$T_e = E - E' \dots\dots\dots(13)$$

O fóton espalhado pode interagir novamente com a matéria e dependendo da dimensão do meio, toda sua energia pode ser absorvida ou não.

c) Produção de pares

Ocorre quando a energia do fóton incidente for maior que 1,02 MeV, ou seja, duas vezes a energia de repouso do elétron. Isto ocorre nas proximidades do núcleo e o fóton é completamente absorvido.

Sua energia é convertida em massa de repouso de um elétron e um pósitron, os quais possuem cargas iguais, mas sinais contrários e o restante em energia cinética dessas. As energias cinéticas dessas partículas são dadas por:

$$T_{e^-} = T_{e^+} = \frac{E - 2 \cdot m_0 \cdot C^2}{2} \dots\dots\dots(14)$$

O elétron perde completamente sua energia para o meio. O pósitron também interage com o meio e quando a sua energia atinge aproximadamente 10 eV, ocorre uma reação de aniquilamento deste pósitron com um outro elétron qualquer do meio.

Figura 10. Representação esquemática do processo de produção de pares.

Neste processo de aniquilação os dois elétrons são consumidos e dão origem a dois raios gama de 0,51 MeV, que saem num ângulo de 180 graus entre eles. Um esquema da produção de pares é mostrado na figura 10.

2.4. Atenuação de um feixe de raios gama

Devido às interações descritas no item 2.3, um feixe de raios gama ao passar por um material, sofre uma atenuação, ou seja, parte dos fótons passam sem interagir e outra parte transfere total ou parcialmente sua energia à matéria, isto é, são absorvidos.

A relação entre o feixe incidente (I_0) e o emergente (I), num determinado meio material homogêneo de espessura x é:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) \dots\dots\dots(15)$$

onde μ é uma constante de proporcionalidade chamada coeficiente de atenuação linear (μ ; cm^{-1}).

O coeficiente de atenuação linear depende de vários parâmetros. Entre eles a energia da radiação, a composição química e a densidade do material absorvedor.

Como o coeficiente de atenuação linear varia com a densidade do material (D), é conveniente expressar a atenuação em termos do coeficiente de atenuação em massa ($\bar{\mu}$; cm^2/g), que é uma constante para

um determinado material:

$$\bar{\mu} = \mu / D \quad \dots\dots\dots(16)$$

O coeficiente de atenuação pode ainda ser expresso em termos de átomos e elétrons:

$$\text{COEF. DE ABSOR. ATOMICO} = \frac{\mu}{D} \cdot \frac{A}{N} ; \text{cm}^2 / \text{atomo} \dots\dots(17)$$

$$\text{COEF. DE ABSOR. ELETRONICO} = \frac{\mu}{D} \cdot \frac{A}{N} \cdot \frac{1}{Z} ; \text{cm}^2 / \text{elét} \dots\dots(18)$$

onde A é o átomo-grama, Z o número atômico e N o número de Avogadro.

Cada processo de interação da radiação com a matéria contribui independentemente para o coef. de absorção total de um material, como mostrado na figura 11.

Figura 11. Coeficiente de atenuação em massa, da água em função da energia (JOHNS & LAUGHLIN, 1982).

Para um material composto de vários elementos químicos, o coeficiente de atenuação em massa é aproximadamente igual a soma proporcional dos coeficientes de cada elemento químico, presente no material, ou seja:

$$\bar{\mu} = \sum (\bar{\mu}_i \cdot P_i \%) / 100 \dots\dots\dots (19)$$

onde $P_i\%$ é a porcentagem em massa do i - ésimo elemento no material. Experimentalmente obtém-se uma pequena diferença do valor obtido pela eq.(19) devido às alterações causadas pelas ligações entre átomos e moléculas.

O solo é um material poroso, composto de uma grande quantidade de elementos químicos. O seu coeficiente de atenuação em massa reflete então, a somatória dos coeficientes de cada um desses elementos.

No entanto, para um dado solo é possível se calcular experimentalmente o coeficiente de atenuação através da medida do feixe de radiação que incidiu e que emergiu do material, da espessura percorrida pelo feixe e da densidade do material. Alterações na atenuação (cm^{-1}) para uma determinada amostra de solo, é atribuída a variações da densidade (ou umidade). A partir daí, pode-se calcular a densidade e a umidade do solo, como mostram as equações 20 e 21, abaixo:

$$I = I_0 \cdot \exp [-(\bar{\mu}_s \cdot x_s + \bar{\mu}_a \cdot x_a)] \dots\dots\dots (20)$$

$$I = I_0 \cdot \exp [-x \cdot (\bar{\mu}_s \cdot D_s + \bar{\mu}_a \cdot \theta \cdot D_a)] \dots\dots\dots (21)$$

onde μ_s e μ_a são os coeficientes de atenuação lineares do solo e da água respectivamente, $\bar{\mu}_s$ e $\bar{\mu}_a$ o coeficiente de atenuação em massa do solo e da água, x a espessura do solo atravessada pelo feixe de fótons, D_s e D_a a densidade do solo e da água respectivamente e θ a umidade do solo.

Um detalhamento da passagem da eq. (20) para (21), pode ser encontrado em CRESTANA (1985).

Finalmente, dividindo a eq.(21) pela (15) e fazendo $D_a = 1 \text{ g/cm}^3$, obtém-se:

$$\mu = \bar{\mu}_s \cdot D_s + \bar{\mu}_a \cdot \theta \dots\dots\dots(22)$$

A eq.(22) mostra que na medida do coeficiente de atenuação linear de um solo, estão embutidos os parâmetros densidade e umidade. Esta informação é especialmente importante para o entendimento da técnica da tomografia computadorizada no estudo de parâmetros físicos do solo, que será abordado no item 2.6.

2.5. Espectrometria gama

Todo o suporte para a detecção da radiação gama e determinação de seu espectro, é conhecido como espectrometria gama. Na figura 12 é apresentado um diagrama de blocos de um espectrômetro gama (monocanal), ou seja, de um medidor de radiação gama.

Figura 12.

Diagrama de blocos de um espectrômetro gama monocanal.

Segue-se agora uma descrição dos principais componentes deste sistema:

CRISTAL CINTÍLADOR

A radiação gama a ser detectada pelo sistema de espectrometria gama incide num cristal cintilador, por exemplo de NaI(Tl) e retira elétrons deste através dos processos de interação descritos anteriormente. Esses elétrons interagem com a rede cristalina do NaI fazendo-a vibrar, ou seja, se excitam. Na desexcitação há emissão de radiação eletromagnética, que para o caso do NaI(Tl) está na região do visível em torno de 430 nm. A figura 13 esquematiza tal processo.

Para que toda a radiação gama incidente seja detectada, deve haver absorção total e consequente transformação desta em luz. No efeito fotoelétrico, toda energia é absorvida. Já no efeito Compton e produção de

Figura 13. Esquema do processo da interação de um fóton gama com um cristal cintilador.

pares nem toda a energia é transferida para o cristal, pois os fótons gama espalhados e criados podem sair do cristal. Um aumento do tamanho do cristal cintilador, aumenta a eficiência de detecção.

VALVULA FOTOMULTIPLICADORA

A luz proveniente do cristal incide, numa válvula fotomultiplicadora, passando pela janela de quartzo e vindo a colidir com o fotocatodo (fina camada de uma liga de Césio - Antimônio). A energia de ligação dos elétrons do fotocatodo é aproximadamente 1,5 eV e a do fóton incidente 3 eV. Portanto por efeito fotoelétrico, os elétrons são retirados do fotocatodo e acelerados por uma diferença de potencial entre o catodo e o primeiro dinodo.

Os dinodos são também recobertos com Cs-Sb e separados por uma diferença de potencial crescente. Deste modo, depois de percorrer vários dinodos, os elétrons multiplicados são coletados no anodo (figura 14).

Figura 14. Esquema de funcionamento de uma válvula fotomultiplicadora.

A amplitude do pulso será proporcional à energia da radiação incidente, pois quanto maior a energia dos fótons maior será a quantidade de elétrons criados.

DIVISOR DE TENSÃO E ALTA TENSÃO

A fotomultiplicadora é alimentada com alta tensão, pois a diferença de potencial entre o catodo e o anodo é de aproximadamente 800 volts.

Um divisor de tensão é utilizado para dividir a alta tensão entre os dinodos que têm diferenças de potenciais crescentes.

PRÉ-AMPLIFICADOR E AMPLIFICADOR

A função do pré-amplificador é manter a amplitude do sinal que é transmitido por um cabo, para que

este não seja perdido pela resistência ôhmica do cabo.

O amplificador aumenta o sinal (amplifica) deixando num nível em que possa ser utilizado pelo resto do sistema eletrônico.

ANALISADOR MONOCANAL

A amplitude do pulso que sai do amplificador é proporcional à energia da radiação. A ocorrência do efeito Compton e produção de pares faz com que apareçam fótons de energias diferentes das que incidem no cristal cintilador e portanto formam-se pulsos com amplitudes variadas, dando ao espectro de energias uma distribuição normal com o valor máximo no fotopico.

O analisador discrimina os pulsos com amplitudes acima de um determinado valor (modo integral) ou entre dois extremos de amplitudes (modo diferencial)

CONTADOR E TEMPORIZADOR

O contador identifica os pulsos discriminados no analisador, contando-os num intervalo de tempo, selecionado no temporizador.

2.6. Tomografia computadorizada

Na tomografia computadorizada por transmissão, um feixe de raios X ou gama é varrido numa

seção transversal de um objeto, como mostra a figura 15. Se a radiação é monoenergética, a transmissão é dada pela eq.(15), quando para um objeto homogêneo.

Se a radiação atravessa duas regiões com coeficientes de atenuação lineares μ_1 e μ_2 e espessuras x_1 e x_2 , a transmissão é dada por:

$$I = I_0 \cdot \exp [-(\mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2)] \dots\dots\dots(23)$$

Para (n) regiões com diferentes coeficientes, tem-se:

$$I = I_0 \cdot \exp \left(- \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_i \right) \dots\dots\dots(24)$$

Com apenas uma medida de transmissão, os coeficientes de atenuação não podem ser determinados, pois existem muitos valores desconhecidos na eq.(24). No entanto, com múltiplas medidas de transmissões para diferentes orientações do feixe, os coeficientes de atenuação lineares na seção transversal podem ser determinados.

Figura 15. Princípio básico de operação de um tomógrafo de primeira geração na qual medidas de transmissão são acumuladas enquanto o objeto é rodado e transladado entre a fonte e o detector (HENDEE, 1984).

Figura 16. Movimentos de varredura na tomografia computadorizada. A)- Tomógrafo de primeira geração usando um feixe colimado, com movimentos combinados de translação e rotação. B)- Tomógrafo de segunda geração com feixe em leque, vários detectores e movimentos combinados de rotação e translação. C)- Tomógrafo de terceira geração usando um feixe em leque, uma série de detectores e apenas movimento de rotação. D)- Tomógrafo de terceira geração usando um feixe em leque, uma série circular de detectores e apenas movimentos de rotação (HENDEE, 1984).

Esses valores de coeficientes de atenuação lineares de uma seção transversal espacialmente distribuídos, formam uma imagem quando se atribui a eles tonalidades de cinza, cores ou quantidade de pontos.

Tomógrafos de primeira geração, fornecem imagens de objetos através de movimentos combinados de

rotação e translação (do objeto ou fonte e detector), com um feixe colimado de radiação, sendo a radiação medida apenas com um detector (figura 16a). Tomógrafos de segunda geração, fornecem imagens por movimentos combinados de rotação e translação de vários feixes colimados ou um em forma de leque e a utilização de vários detectores, movimentando-se juntamente com a fonte (figura 16b).

Nos tomógrafos de terceira geração, as imagens são obtidas somente por movimentos de rotação de um feixe em forma de leque, com um número ainda maior de detectores, movendo-se juntamente com a fonte (fig. 16c). Existem atualmente tomógrafos mais modernos que utilizam uma cadeia de detectores parados, bastando o movimento de rotação da fonte para se obter uma imagem (fig. 16d).

Num tomógrafo de primeira geração, o tempo para aquisição dos dados varia de alguns minutos a algumas horas. Já nos tomógrafos de segunda geração, o tempo de aquisição varia de 20 a 60 segundos. Nos tomógrafos de terceira geração, o tempo para a aquisição é de poucos segundos.

Como resultado final da aquisição de dados, a partir da transmissão dos fótons, tem-se uma matriz com valores dos coeficientes de atenuação lineares, referentes à seção transversal da amostra. Cada linha da matriz é uma projecção, a qual é obtida com cada movimento de rotação. As colunas referem-se às transmissões nas translações ou

em cada transmissão do feixe em leque.

A matriz de dados é transformada numa matriz imagem através de algoritmos de reconstrução, que podem ser de quatro tipos distintos. Em HERMAN (1980) encontra-se uma descrição detalhada desses algoritmos, com todos os procedimentos matemáticos envolvidos. A seguir é feita uma breve descrição desses métodos:

a) Retroprojeção simples: Neste método cada medida de transmissão (ou elemento) é dividido num número (n) de elementos. Pela soma da atenuação para cada elemento (μ_i / n), sobre todas as projeções que interceptam o elemento para cada orientação angular, ou projeção ($\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K$), obtém-se o coef. de atenuação linear no dado elemento e assim para todos os elementos da matriz (figura 17). Este tipo de reconstrução produz imagens com artefatos (manchas), nas extremidades.

Figura 17. Representação esquemática da reconstrução com o algoritmo da retroprojeção simples.

b) equações integrais: Este algoritmo de reconstrução usa uma equação integral unidimensional, para filtrar os artefatos provenientes da retroprojeção simples através de um filtro que remove os componentes de altas frequências.

Este método é chamado também de convolução ou retroprojeção filtrada e é o mais popular algoritmo de reconstrução usado atualmente na tomografia computadorizada (HENDEE, 1984).

c) transformada de Fourier: Neste método as transmissões em cada orientação angular são separadas em componentes de frequência de várias amplitudes. Desses componentes, toda a matriz é trabalhada no espaço de frequência e então reconstruída por um processo de transformada de Fourier inversa.

d) expansão em séries: Nesta técnica, dados de atenuação numa orientação angular (linha da matriz de dados) são divididos em elementos igualmente espaçados. Esses dados são comparados com dados similares em diferentes orientações angulares e diferenças na atenuação em duas orientações são somadas igualmente para elementos adequados. Este processo é repetido para toda orientação angular, com um decréscimo da fração da diferença de atenuação somada a cada tempo, para assegurar convergência da reconstrução dos dados.

A imagem nada mais é que um mapa de

coeficientes de atenuação lineares de uma seção transversal do objeto, ou seja, uma fatia deste. A espessura dessa fatia depende da espessura do feixe de radiação, o qual é definido pela abertura no colimador situado à frente do detector.

Figura 18. Representação dos elementos da imagem de uma seção transversal de um objeto.

A área de cada elemento na imagem é chamado de PIXEL, o qual multiplicado pela espessura da seção transversal, define um VOXEL, que é um elemento de volume (figura 18).

Um pixel possui um valor numérico chamado UNIDADES HOUNSFIELD (o qual define uma tonalidade ou cor na imagem), que não é exatamente igual ao coeficiente de atenuação linear, mas relacionado diretamente com este pela seguinte equação:

$$UH = \frac{(\mu - \mu_a)}{\mu_a} \times 10^3 \dots\dots\dots (25)$$

onde μ é o coeficiente de atenuação linear do material na porção em que o feixe de radiação está interagindo e μ_a o

coeficiente de atenuação da água.

Como foi visto nas seções 2.3 e 2.4, o coeficiente de atenuação linear, varia com a energia da radiação incidente, com o número atômico e a densidade física do objeto. Fixando a energia e o número atômico a tomografia passa a depender apenas da densidade do objeto. Para materiais porosos, como o solo, depende ainda de sua umidade.

Substituindo μ da eq.(22) na eq.(25), obtem-se que:

$$UH = \left(\frac{\bar{\mu}_s}{\mu_a} \cdot Ds + \Theta - 1 \right) \times 10^3 \dots\dots\dots(26)$$

ou seja, o valor numérico de um pixel da imagem de uma determinada amostra de solo, varia com a densidade e umidade deste.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Tomografia computadorizada

O desenvolvimento de técnicas de reconstrução de imagens se deu no início do século, inicialmente nas áreas de astronomia solar (produção de mapas de radiação de microondas da superfície do sol), micrografia eletrônica (imagens por transmissão de elétrons) e numa grande variedade de problemas ópticos.

Na década de 70, a tomografia computadorizada por transmissão de raios X, foi introduzida na área de imagens médicas, com um grande impacto na história da radiologia. Em HERMAN (1980) encontramos uma detalhada descrição sobre a teoria de reconstrução de imagens e HENDEE (1983) fornece uma lista de referências com algumas aplicações nessas áreas e faz também uma descrição dos princípios físicos da TC.

O potencial da reconstrução tomográfica como técnica de imagens clínicas, teve reconhecimento primeiramente por OLDENDORF (1961), que construiu o primeiro protótipo constituído de uma fonte de ^{131}I e um detector de cintilação, no qual o objeto rodava e

transladava entre a fonte e o detector. No entanto, os métodos de reconstrução matemática não forneciam imagens muito nítidas. O físico CORMACK (1963 e 1964) introduziu correções na teoria da reconstrução para corpos não homogêneos, sendo seus trabalhos publicados em revistas científicas de física, os quais lhe valeram (juntamente com G.N.HOUNSFIELD) o prêmio nobel de Fisiologia e Medicina por seu trabalho pioneiro na reconstrução tomográfica.

No fim da década de 60 e início de 70, vários pesquisadores exploraram a reconstrução tomográfica como possível tratamento clínico. No entanto, foi apenas com o trabalho de HOUNSFIELD (1972), um engenheiro do laboratório de pesquisa central da Electro - Musical Instruments (EMI) Ltd, que a tomografia alcançou grande avanço na área médica. Hounsfield, concordando com Cormack, mostrou que uma secção transversal do interior do corpo humano poderia ser obtida por atenuação de raios X ou gama com uma precisão de 0.5% no coeficiente de atenuação, sem expor o paciente a doses excessivas de radiação.

A partir daí houve grandes avanços, chegando-se a equipamentos muito sofisticados, rápidos e seguros, tornando a técnica muito útil e bastante difundida nos dias de hoje.

O primeiro trabalho de aplicação da técnica

da reconstrução tomográfica por transmissão de radiação em ciências do solo surgiu com PETROVIC et alii (1982), o qual usou a TC para determinar a distribuição espacial das densidades de amostras de solo com um tomógrafo médico (imagens tri - dimensionais). Neste trabalho Petrovic observou que há uma linearidade entre a densidade do solo e a tonalidade da imagem, representada pela unidade Housfield (UH). No entanto, embora tentasse, foi incapaz de correlacionar UH com a variação de umidade em amostras de solo.

Um ano após, HAINSWORTH & AYLMORE (1983) apresenta um exame da possibilidade do uso da TC para estudar mudanças espaciais no conteúdo de água (umidade) num solo, com um estudo da difusão da água do solo para uma raiz de rabanete, concluindo que a técnica (usa um tomógrafo com imagens bi dimensionais) é muito potente para se estudar o sistema água-solo-planta, embora não tenha discutido o problema da calibração das UH com a umidade.

Concomitantemente CRESTANA (1985) e CRESTANA et alii (1985) propôs um novo método para o estudo da infiltração da água no solo em tempo real, usando a tomografia bi e tri-dimensional de raios X e gama. Além dos estudos dinâmicos de água no solo, onde foram medidas velocidades da ordem de 6 mm/min foram obtidas também calibrações mostrando a linearidade entre densidade, umidade do solo e UH.

O custo aproximado de um tomógrafo médico pode variar de 100 mil a um milhão de dólares, tornando-se uma grande limitação para uma maior difusão da técnica na ciência do solo. A partir desta consideração, CRESTANA et alii (1986) e CRUVINEL (1987) propuseram e construíram um minitomógrafo computadorizado de raios X e gama, utilizando tecnologia nacional através da UAPDIA-EMBRAPA em São Carlos-SP, para estudos em ciência do solo, cujo custo é de cerca de vinte a cinquenta mil dólares, abrindo novas possibilidades para uma maior difusão desta técnica.

Seguindo a mesma linha anterior do trabalho de 1983 HAINSWORTH (1986) apresentou um trabalho onde estudou a extração de água por uma raiz de rabanete submetida a duas condições iniciais distintas de umidades, ambas com altas e baixas taxas de transpiração. Comparando os dados experimentais obtidos com modelos de aproximações analíticas, o autor mostrou que os modelos não descreviam satisfatoriamente o processo de extração de água.

BROWN et alii (1987) revisou alguns conceitos da TC para aplicações em meios porosos e estudou a distribuição espacial da água em três meios porosos artificiais distintos.

ANDERSON et alii (1988) encontrou relações lineares entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade do solo para dois solos e atribuiu diferenças encontradas entre esses solos às diferenças de quantidades

de ferro. Variando as quantidades de ferro para várias amostras de um mesmo solo, obteve também uma relação linear entre a concentração de ferro e UH. Finalmente chama a atenção da necessidade de uma relação universal entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade do solo.

CRESTANA et alii (1988) apresenta vários resultados de aplicações da TC em pesquisas de solos. Entre eles destaca-se a simulação dinâmica tri-dimensional da irrigação por gotejamento em uma coluna de solo de 7.5 cm de altura e 8.3 cm de diâmetro interno. O fluxo de gotejamento foi mantido constante em $4.8 \text{ cm}^3/\text{min}$ e mesmo assim observou-se direções preferenciais no movimento da água, indicando heterogeneidades no solo.

Outra aplicação bastante interessante neste trabalho é o estudo da germinação de sementes e absorção de água pelas raízes. Um acompanhamento periódico de uma semente de milho germinando num recipiente com solo, revelou que do início ao fim da germinação a intensidade da imagem na semente variou de 268 a -16 UH. A região negativa indica a presença de ar. Conclui-se com esses resultados que no processo de germinação de uma semente há um enorme consumo de nutrientes em certas regiões da semente, levando a um volume cheio de ar.

Outro estudo realizado neste trabalho foi a utilização de traçadores no acompanhamento da solução do

solo com a tomografia diferencial, que é baseada no fenômeno da descontinuidade fotoelétrica presente em alguns elementos químicos.

Também recentemente JENSSEN et alii (1988) utilizou a TC para estudar heterogeneidades em colunas de solo arenoso usados em experimentos de transporte de água e purificação de águas poluídas. Os resultados mostraram que a TC é uma ferramenta bastante útil para avaliar procedimentos de preparo de colunas de solo usadas em experimentos de laboratório.

A TC ainda não foi utilizada, até o presente momento, em estudos de compactação do solo, mas PETROVIC et alii (1982) citou o grande potencial da técnica em estudos dessa natureza, fazendo alguns experimentos básicos, nos quais detectou problemas como o endurecimento do feixe e determinou a sensibilidade para variações de densidade. Também CRESTANA (1985) e CRESTANA et alii (1988) enumerou várias possibilidades de aplicação da TC. Uma delas foi o estudo da compactação do solo, tema desta dissertação.

3.2. Métodos de medidas de compactação do solo

A quantificação da compactação do solo pode ser feita através de medidas de parâmetros do solo diretamente relacionados com o fenômeno, que segundo

FREITAG (1971) são : Porosidade (total e distribuição de tamanho de poros) e a matriz do solo, que refletem a geometria relativa e orientação das partículas e espaços vazios associados. Esses métodos podem ser divididos em três classes :

a) Estudo da compactação pela medida das características do solo alteradas no processo :

- Medida da densidade (ou porosidade) média.
- Medida da distribuição de tamanho de poros.
- Medida da distribuição espacial da densidade em volumes infinitesimais (suficientemente pequenos).

b) Estudo da compactação pela medida das propriedades do solo alteradas no processo :

- Medida da condutividade hidráulica do solo.
- Medida da difusão de gases no solo.
- Penetrômetro : medida da resistência de penetração de uma haste no solo.

c) Estudo baseado em medidas de transmissão de pressões no solo através de transdutores de pressão.

Abaixo é feita uma revisão dos principais métodos de medidas em cada uma das classes descritas :

a.1) Densidade do solo por gravimetria

Os métodos mais comuns de determinação da

densidade do solo são baseados no cálculo da massa e volume de uma amostra de solo. Em FREITAG (1971) encontra-se uma boa revisão dos principais métodos de medida da densidade do solo, concluindo que a maior dificuldade na medida da densidade é a determinação do volume, principalmente para amostras irregulares. Uma grande variedade de métodos foram desenvolvidos para determinar volumes, mas nenhum pode ser considerado ideal para todos os casos.

Para amostras com formas irregulares é comum introduzi-las num fluido (por exemplo mercúrio) e medir o volume deslocado. Quando a amostra é selada com parafina, pode ser medido um volume deslocado de água.

Outra forma de medir o volume é introduzir um amostrador no solo, de modo que se obtenha uma amostra de volume conhecido. Diferentes tipos de amostradores tem sido usados em trabalhos de solo, muitos deles especialmente desenvolvidos para um tipo particular de solo. HVORSLEV (1949) faz uma exaustiva descrição de equipamentos e técnicas usadas em amostragens para fins de engenharia civil.

KIEHL (1979) apresenta como principais métodos de determinação da densidade do solo, a) Método do balão volumétrico, que utiliza um balão de vidro com volume constante, no qual é colocado solo fino seco ao ar e peneirado; b) Método do anel volumétrico, que utiliza um

anel de aço, o qual é introduzido no solo e retirada uma amostra; c) Método do torrão impermeabilizado, no qual um torrão de solo é envolvido com parafina, de modo a impermeabilizá-lo e o seu volume medido pelo volume de água deslocado ou pela medida do empuxo na água; d) Método da escavação, que consiste em se cavar um buraco no solo, pesar a massa (seca) retirada e medir o volume adicionando areia ou um balão de borracha cheio de água.

LAUNDRE' (1989) compara os métodos do buraco com areia, ou água e amostrador de volume constante, chegando à conclusão que não apresentam diferença significativa para os três solos testados.

a.2) Densidade do solo por atenuação de um feixe de raios gama

Através da interação de um feixe de raios gama com uma amostra de solo é possível calcular a densidade deste solo quando seco. FERRAZ & MANSELL (1979) fornece uma descrição completa da técnica com inúmeras medidas para vários solos do Brasil, nas energias de 60 e 660 Kev e aplicações em problemas agronômicos práticos.

a.3) Distribuição de porosidade

A distribuição de porosidade de um solo pode ser obtida através da medida da umidade residual após a aplicação de pressões infinitesimais, isto é, da curva

característica tensão-umidade.

Muitos pesquisadores, entre eles BATEMAN (1963) e VOMICIL & FLOCKER (1961), observaram que a compactação está melhor relacionada com a porosidade e a retenção de água, no ponto de capacidade de campo do que com a sua curva inteira.

O efeito da compactação pode ser observada comparando curvas de distribuição de poros em vários estágios de aplicação de compressões num solo. A compactação tende a reduzir a porosidade total e aumentar a porção de poros pequenos.

b.1) Condutividade de um fluido no solo

MITCHELL et alii (1965) e LAMBE (1960), mostraram que é possível relacionar a compactação do solo com a medida da condutividade hidráulica do solo através de testes feitos em laboratório. No entanto a grande variação da condutividade hidráulica em pontos distintos do solo e o tempo longo das medidas são limitações na utilização da medida da condutividade hidráulica como um indicador da compactação do solo.

NIMMO & AKSTIN (1988) mediram a condutividade hidráulica de um solo submetido a vários tipos diferentes de compactação, provocando uma variação de 33,3 a 38% na porosidade total do solo. Neste caso a condutividade variou entre 7×10^{-11} e 2×10^{-8} m/s.

Da mesma forma CAMPBELL et alii (1986) utiliza a medida da taxa de difusão de gases no solo, como um indicador do efeito da compactação desse solo.

b.2) Penetrômetro

E bastante usado em estudos de compactação de solos agrícolas e mecânica de solos. No entanto, BOLLING (1985) mostra que além da densidade do solo, a medida do penetrômetro depende do tipo de solo, velocidade de penetração e conteúdo de água. Portanto são necessárias calibrações para cada condição especial de solo, equipamento e umidade.

No entanto, este método fornece bons resultados qualitativos. MANTOVANI (1984) utilizou um penetrômetro para avaliar a compactação de um solo submetido a vários tratamentos distintos de compressão por veículos e uso de subsolador, mostrando diferenças significativas entre os tratamentos.

SIMMONS & CASSEL (1989) relacionaram medidas do penetrômetro com as propriedades físicas do solo. A melhor correlação foi obtida entre o índice do penetrômetro (IP) e o logaritmo da condutividade hidráulica. Foram obtidas relações entre IP, densidade e profundidade.

c.1) Transdutores de pressão

O conceito básico da medida da pressão no solo é introduzir nele uma célula que experimentará as mesmas pressões num volume equivalente de solo e que portanto forneçam a magnitude dessa pressão (COOPER et alii, 1957). Essas medidas não revelam o estado de compactação diretamente, mas elas fornecem informações que em conjunto com medidas diretas de compactação, leva a um entendimento do processo mecânico da compactação.

Segundo FREITAG (1971), existem três métodos de medidas de pressões com células sensitivas:

- a) Pressão num fluido;
- b) "Strain gage";
- c) Cristal piezoelétrico;

As dificuldades associadas com medidas de pressões no solo com células sensitivas, surgem de duas deficiências: A célula não responde às forças da mesma maneira que o solo e o processo de colocar a célula no solo causa perturbação deste.

Uma boa aplicação do método de transmissão de pressões é feita por BOLLING (1985), onde em conjunto com o método do penetrômetro e com relações de calibração, estabelece um método de medir a compactação do solo, devido ao tráfego de veículos agrícolas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

É utilizado um tomógrafo computadorizado de raios X ou gama de primeira geração (minitomógrafo), para obtenção de imagens (por transmissão) de seções transversais de objetos, construído na UAPDIA/EMBRAPA em São Carlos-SP (CRESTANA et alii, 1986 e CRUVINEL, 1987). A figura 19 mostra um esquema em blocos e a figura 20 uma foto do equipamento utilizado.

O sistema fonte-detector é composto de uma fonte radioativa emissora de raios gama (^{241}Am ; $E = 59,6$ KeV) com atividade de 300 mCi (1.11 GBq), cristal cintilador de NaI(Tl) de 3" x 3" tipo plano e fotomultiplicadora. Os colimadores são variáveis e neste trabalho são utilizados colimadores de 2mm. A fonte e o detector podem ser movimentados num trilho até uma distância máxima de 23 cm.

Entre a fonte e o detector existe uma mesa que efetua movimentos de rotação e translação, na qual é colocada a amostra que se quer fazer a imagem. Esses dois movimentos são realizados por dois motores de passo, que são controlados por um computador Apple (8 bits), através de uma interface.

Figura 19. Diagrama de blocos do tomógrafo mostrado na foto da figura 20.

Figura 20. Fotografia do tomógrafo computadorizado de raios X e gama de primeira geração, construído na UAPDIA-EMBRAPA em São Carlos.

Após cada combinação de um movimento de rotação e translação, é feita a contagem num tempo determinado (alguns segundos), do feixe colimado que chega ao detector, após interagir com o objeto. Cada fóton que chega ao detector, gera um pulso de amplitude proporcional à sua energia. Um sistema composto de pre-amplificador, amplificador, analisador monocanal, contador e temporizador, conta este pulso e o armazena na memória do computador, enviando-o posteriormente a um disco magnético.

O tempo total para a aquisição de dados é definido em função de alguns parâmetros impostos pelo tipo e tamanho de amostra, resolução desejada, precisão da medida e pelo equipamento. Por exemplo, se for escolhido um feixe com diâmetro de 2 mm (em função de uma resolução desejada de 2 mm) e uma amostra de 100 mm, deve-se utilizar um passo de translação de 2 mm e portanto o número de colunas da matriz de dados e matriz imagem será $(100/2)=50$. Deste modo pode-se obter uma matriz de ordem 50×50 , se for utilizado um passo de rotação de 3,6 graus $(180/50)$.

O tempo de cada aquisição é escolhido em função da precisão desejada, ou seja, é importante que se tenha uma boa estatística de contagem para que se tenha uma boa precisão. Em primeira aproximação o erro de uma contagem de fótons é igual a raiz quadrada deste valor. Portanto para se obter uma precisão de 2% é necessária uma

contagem de 2500 fôtons. A quantidade de fôtons que chega no detector é função da densidade e do tamanho da amostra. Para se aumentar a contagem basta efetuar a medida num tempo mais longo.

Figura 21. Procedimento de coleta e medida de amostras indeformadas numa trincheira, utilizando a técnica da tomografia computadorizada.

A taxa de contagem obtida para uma distância entre fonte e detector de 100 mm e colimadores com diâmetros de 2 mm é de aproximadamente 5000 cps (contagens por segundo). Nos experimentos realizados neste trabalho os tempos totais para a aquisição dos dados de uma tomografia variaram de 1 a 6 horas.

A imagem é reconstruída por um algoritmo matemático (equações integrais ou convolução), podendo ser apresentada no monitor ou na impressora. É possível também imprimir a matriz de dados (fótons transmitidos) e a matriz imagem (CRUVINEL, 1987).

Um esquema do procedimento de medida e quantificação da densidade e umidade de amostras de solo, pela técnica da TC é mostrada na figura 21.

Figura 22. Relação experimental entre UM e o coeficiente de atenuação linear para vários materiais.

As unidades dos elementos da imagem no tomógrafo utilizado não são as usuais Unidades Hounsfield (UH), mas outra relacionada linearmente com ela e que denominaremos Unidades Minitomógrafo (UM). A figura 22 mostra uma relação linear obtida experimentalmente entre UM e o coeficiente de atenuação linear. Substituindo essa relação na eq.(22), obtem-se :

$$UM = 5890 \cdot (\bar{\mu}_s \cdot D_s + \bar{\mu}_a \cdot \theta) \dots\dots\dots(27)$$

A densidade e umidade do solo podem ser determinadas numa seção transversal da amostra, usando o seguinte procedimento descrito :

- a) Mede-se o coeficiente de atenuação em massa do solo e da água. Com esses dados, determina-se a curva de calibração para este solo, utilizando a eq.(27);
- b) Faz-se uma tomografia na posição desejada com a amostra úmida;
- c) Seca-se a amostra em estufa à 105°C por 24h;
- d) Faz-se uma nova tomografia na mesma posição, com a amostra seca. É muito importante a colocação da amostra na mesma posição da tomografia anterior, portanto é recomendável que se faça alguma marca na amostra ao se iniciar a medida;
- e) Determinação da densidade : Com os dados da amostra seca, $\theta = 0$. A eq.(27) fica reduzida a $UM_1 = 5890 \cdot \bar{\mu}_s \cdot D_s$

Portanto para cada pixel da imagem, calcula-se com os valores de UM_1 as densidades correspondentes;

f) Determinação da umidade : Para a imagem da amostra úmida, $\theta > 0$. Portanto: $UM_2 = 5890.(\bar{\mu}_s.D_s + \bar{\mu}_u.\theta)$. Para cada pixel da imagem, calcula-se a umidade a partir da subtração dos 2 valores de UM correspondentes:

$$UM_2 - UM_1 = 5890. \bar{\mu}_u. \theta$$

4.1. Atenuação de um feixe de raios X ou gama

4.1.1. Medidas do coeficiente de atenuação em massa de solos e outros materiais

O minitomógrafo descrito anteriormente pode ser utilizado para medidas de coeficiente de atenuação em massa. Para isso, basta desconectar a interface e assim o sistema nuclear pode ser utilizado manualmente.

O coeficiente de atenuação em massa é calculado medindo-se o número de fótons incidentes (I_0), emergentes (I), a espessura da amostra (X), sua densidade média (D_s) e substituindo-os nas eq. (15) e (16).

São utilizadas como amostras, uma relação de 18 solos, coletados na Usina Sta Bárbara em Sta Bárbara d'Oeste-SP, dois solos da região de São Carlos (LVA e LVE) e outro de Barretos-SP (LVA).

As medidas são feitas com solo seco em

estufa à 105 °C, peneirado em malha de 1 mm e acondicionado em recipientes de acrílico (25 x 25 x 50mm³). São feitas também medidas dos coeficientes de atenuação em massa para água destilada e alumínio.

4.1.2. Correlação entre coeficiente de atenuação linear e densidade do solo

Neste experimento são utilizados dois solos, um latossol vermelho escuro da região de Araras-SP e um latossol vermelho amarelo da região de São Carlos-SP.

As amostras são coletadas numa trincheira, com anéis volumétricos (aço) de raios e alturas iguais a 5 cm. Essas amostras são secas à 105 °C por 24 h e então suas densidades são calculadas, medindo-se suas massas e os volumes dos anéis. Depois disso o coeficiente de atenuação linear é determinado para todas as amostras, medindo-se o feixe emergente (I) e incidente (I₀) e usando o valor da espessura do solo (x).

4.2. Tomografia : calibração e quantificação *STU*

Uma calibração deve ser feita para cada tipo de solo, para que se possa quantificá-lo em termos de densidade e umidade. Para tanto basta medir o coeficiente de atenuação em massa para este solo e para a água.

Para uma dada imagem de uma amostra, a quantificação da densidade e umidade pode ser feita em

termos da média ou moda dos valores da amostra. Fazendo a distribuição de frequências dos dados de uma imagem é possível estudar a homogeneidade da amostra, pois quanto mais homogênea, menor a dispersão dos dados em torno da moda e menor a diferença entre a média e a moda.

Quando a amostra é heterogênea, o estudo é feito analisando as variações através dos dados da matriz imagem. Isso pode ser feito analisando um perfil ou uma média deles, numa direção de interesse.

Nestes experimentos que se seguem, são utilizados colimadores com diâmetros de 2 mm. Deste modo, utilizando passos de translação de 2 mm define-se uma resolução de 2 mm.

Os recipientes utilizados nos experimentos com amostras de solo deformado, peneirado em peneira de 1 mm, são de acrílico (3 mm de espessura) e têm dimensões internas de 25 x 25 x 50 mm³.

4.2.1. Relação entre UM e Ds

São utilizadas amostras de um Latossol Vermelho Escuro, da região de Araras-SP. No preparo das amostras, o solo é seco à 105 °C e peneirado com peneira de 1 mm. Esse solo é introduzido nos recipientes de acrílico, de modo a se obter 8 amostras com densidades distintas e homogêneas.

Para cada recipiente é feita uma imagem de uma seção transversal. Na região da imagem referente ao solo, faz-se uma média das UM. A densidade de cada amostra é calculada por gravimetria e então esses dados são apresentados num gráfico UM vs Ds.

4.2.2. Relação entre UM e Θ

São utilizadas amostras de um Latossol Vermelho Amarelo, da região de Barretos-SP. No preparo das amostras, o solo é seco, peneirado (1mm) e introduzido nos recipientes de acrílico, de modo a se obter 8 amostras com densidades constantes e homogêneas.

Para cada recipiente é feita a imagem de uma seção transversal e obtida a média das UM no interior desta. A umidade de cada amostra é medida por transmissão direta de raios gama. Os dados são apresentados num gráfico UM vs Θ .

4.3. Estudo de compactação dos solos por tomografia

4.3.1. Finas camadas de solo compactado (laboratório)

Neste experimento é utilizado um Latossol Vermelho Escuro, da região de São Carlos, seco e peneirado (1 mm), cujo coeficiente de atenuação vale $0,342 \text{ cm}^2 / \text{g}$. Portanto sua equação de calibração é:

$$\text{UM} = 2014.D_s + 1196.\Theta$$

As amostras são feitas utilizando os recipientes de acrílico, conforme mostra a figura 23. Para se obter essas amostras, utiliza-se dois pedaços de alumínio com as faces planas e dimensões de 24 x 24 x 100 mm³, de tal modo que esses possam ser usados para compactar uma certa quantidade de solo (umidecido para facilitar a compactação e aderência), na região central do recipiente.

Figura 23. Amostra para o estudo de camada de solo compactado.

Depois disso, preenche-se o restante do recipiente, com solo peneirado e leva-se novamente à estufa para secagem.

Com essas amostras, são feitas imagens de seções transversais e essas quantificadas em termos de densidade através da matriz imagem, analisando-se perfis na direção perpendicular à lâmina compactada. Para cada imagem é obtido um perfil médio e então os dados são

colocados num gráfico, com a densidade na ordenada e a distância na amostra na abscissa.

4.3.2. Compactação por compressão (laboratório)

O solo utilizado neste experimento é o mesmo do item anterior (4.3.1). As amostras são feitas, utilizando os recipientes de acrílico, de modo a se obter amostras com densidades homogêneas em todos os recipientes.

A essas amostras são fornecidas certas quantidades de água, de modo a deixá-las com umidades iguais a zero (seca), 0,10; 0,20; 0,30 e 0,36 g/g.

Utilizando a montagem da figura 24, imprime-se uma pressão de 0,8 MPa, na superfície superior de cada amostra, por um certo tempo, até que cessem as deformações no interior do solo.

Depois disso, as amostras são secas e então analisadas pelo tomógrafo, num plano paralelo ao eixo de aplicação da pressão.

As amostras são quantificadas em termos de densidade, em perfis paralelos ao eixo de aplicação da pressão, de modo a caracterizar as deformações nesta direção. Esses dados são apresentados num gráfico, com a densidade na ordenada e a distância na amostra na abscissa.

Figura 24. Equipamento utilizado na compactação de amostras de solo por compressão estática.

Figura 25. Representação esquemática da coleta de amostras, após a passagem de implementos agrícolas no solo.

4.3.3. Compactação por compressão de implementos (campo)

Neste experimento é utilizada uma área experimental do IAA/PLANALSUCAR em Araras-SP, cujo solo é um Latossol Vermelho Escuro. O coeficiente de atenuação deste solo vale $0,433 \text{ cm}^2/\text{g}$, portanto sua equação de calibração vale: $UM = 2550.Ds + 1196.\theta$

As amostras são coletadas com um instrumento cortante, de modo que se obtenha amostras indeformadas (torrões), após a passagem de um implemento sulcador, conforme ilustra a figura 25.

São realizadas várias amostragens em condições distintas de densidade, umidade, peso e abertura das lâminas do implemento.

Após cada coleta, as amostras são envolvidas com parafina fundida para que conservem suas umidades originais e possam ser levadas ao laboratório sem se quebrarem. Com uma caneta porosa, anota-se a direção na qual as pressões agiram nessas amostras.

Após ser retirada a parafina das amostras, essas são secas e então feitas imagens de seções transversais paralelas à direção de propagação das pressões, de modo a se caracterizar as deformações causadas neste solo, devido à compressão do implemento.

4.3.4. Tomografia vs Penetrômetro (campo)

E utilizada uma área experimental na UEPAE/EMBRAPA em São Carlos, cujo solo é um latossol vermelho escuro, com um coeficiente de atenuação de $0,342 \text{ cm}^2/\text{g}$. Essa área no passado, foi extensivamente utilizada para o cultivo de cereais e atualmente apresenta um acentuado problema de compactação causado por implementos (pé de arado).

Nesta área são abertas duas trincheiras, separadas por uma distância de 10 metros, com dimensões de $1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ m}^3$. Nessas trincheiras, são coletadas amostras em forma de torrões indeformados, de modo a caracterizar o perfil de densidades na profundidade. Essas amostras são retiradas da parede da trincheira, com uma ferramenta cortante e envolvidas com parafina derretida, de modo que possam ser transportadas até o laboratório com segurança, evitando que se quebrem. Na superfície da parafina faz-se uma marca do eixo Z (profundidade), com uma caneta porosa, para não se perder a referência. A figura 21 apresenta um esquema da coleta, análise e quantificação dessas amostras.

Ao redor das duas trincheiras, faz-se sondagens com um penetrômetro de impacto (modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF) para várias situações de umidades e retiradas amostras para o cálculo das umidades à base de massa.

A figura 26 mostra um esquema do experimento descrito.

Figura 26. Representação esquemática da coleta de amostras numa trincheira e medidas com penetrômetro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Atenuação de um feixe de raios gama

5.1.1. Medidas do coeficiente de atenuação em massa de solos e outros materiais.

Tabela II. Coeficiente de atenuação em massa para vários solos.

TIPO MATERIAL	NUMERO MEDIDAS	COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO (cm ² /g)	DESVIO PADRAO
AGUA DESTILADA	68	0,200	0,002
ALUMINIO	4	0,255	0,004
SOLO LVE (São Carlos)	4	0,342	0,007
" LVA (" ")	23	0,284	0,005
" LVA (Barretos)	11	0,286	0,002
" LVE (Araras)	13	0,432	0,005
" LVD (Sta Bárbara)	3	0,304	0,005
" TE (" ")	2	0,416	0,007
" LRd (" ")	1	0,378	
" PV (" ")	1	0,265	
" PV (" ")	1	0,258	
" PV (" ")	1	0,271	
" PV (" ")	1	0,286	
" PE (" ")	1	0,273	
" LRe (" ")	1	0,411	
" LAD (" ")	1	0,313	
" LAD (" ")	1	0,291	
" LAD (" ")	1	0,256	
" TE (" ")	1	0,378	
" TE (" ")	1	0,312	
" GHd (" ")	1	0,396	
" PV (" ")	1	0,277	
" PE (" ")	1	0,255	

Vários coeficientes de atenuação em massa de solos, água e outros materiais foram medidos na energia de 60 Kev. Esses dados são apresentados na tabela II.

Os resultados mostram uma variação média em torno de 1%, no cálculo do coeficiente de atenuação em massa. Precisão semelhante foi encontrada por FERRAZ & MANSELL (1979). Para os mais variados tipos de solos, os coeficientes de atenuação possuem uma grande variação, indo de aproximadamente 0,25 cm²/g para solos com altos teores de areia, à aproximadamente 0,43 cm²/g para solos argilosos e com altos teores de ferro.

5.1.2. Correlação entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade do solo

O coeficiente de atenuação linear de um solo, possui uma correlação linear com a densidade deste, conforme mostra a eq.(22). Na figura 27 é mostrado o resultado do experimento conduzido para determinar esta correlação. Abaixo são apresentadas as regressões obtidas:

$$(LVE-Araras), \mu = 0.032 + 0.406 \cdot Ds$$

$$(LVA-S. Carlos), \mu = 0.001 + 0.275 \cdot Ds$$

Como esperado, obteve-se uma correlação linear, onde os coeficientes angulares das retas são aproximadamente iguais aos coeficientes de atenuação em massa desses solos.

Figura 27. Medidas do coeficiente de atenuação linear para amostras de várias densidades em dois solos.

5.2. Tomografia: Calibração e quantificação

A figura 28 mostra duas imagens (amostra úmida e seca) de uma mesma seção transversal de uma amostra de solo LVE-São Carlos-SP (peneirado - 1 mm).

Nas figuras 29 a) e b) são apresentados os dados da região central da matriz imagem da amostra, quando úmida e seca respectivamente.

a)

b)

Figura 28. Imagens de uma seção transversal de uma amostra de solo fino peneirado, quando úmido (a) e seco (b).

a)

UM1 =
(MATRIZ
IMAGEM
ÚMIDA)

...	2673	2697	2675	2627	2621	2645	2541	...
...	2683	2628	2753	2715	2676	2679	2597	...
...	2667	2739	2743	2691	2673	2682	2627	...
...	2642	2698	2724	2653	2641	2701	2639	...
...	2650	2694	2730	2690	2655	2672	2675	...
...	2608	2734	2684	2676	2640	2657	2622	...
...	2629	2722	2636	2604	2609	2544	2453	...
...	.	.	.	.	.	.	.	...
...	.	.	.	.	.	.	.	...

b)

UM2 =
(MATRIZ
IMAGEM
SECA)

...	2160	2121	2152	2151	2070	2070	2010	...
...	2092	2152	2153	2132	2116	2062	1989	...
...	2116	2233	2172	2144	2139	2109	2084	...
...	2064	2232	2170	2165	2119	2103	2055	...
...	2125	2156	2198	2208	2149	2107	2065	...
...	2098	2186	2178	2179	2125	2149	2023	...
...	2080	2115	2135	2102	2039	2022	1953	...
...	.	.	.	.	.	.	.	...
...	.	.	.	.	.	.	.	...

c)

Ds =
(g/cm³)

...	1.072	1.053	1.068	1.068	1.028	1.028	0.998	...
...	1.039	1.068	1.060	1.058	1.050	1.024	0.987	...
...	1.050	1.109	1.078	1.064	1.062	1.047	1.035	...
...	1.023	1.108	1.077	1.075	1.052	1.044	1.020	...
...	1.055	1.070	1.091	1.096	1.067	1.046	1.025	...
...	1.042	1.085	1.081	1.082	1.055	1.066	1.004	...
...	1.033	1.050	1.060	1.043	1.012	1.004	0.970	...
...	.	.	.	.	.	.	.	...
...	.	.	.	.	.	.	.	...

d)

Θ =
(cm³/cm³)

...	0.436	0.489	0.444	0.404	0.468	0.488	0.451	...
...	0.502	0.404	0.525	0.495	0.475	0.524	0.516	...
...	0.468	0.420	0.485	0.464	0.453	0.486	0.461	...
...	0.491	0.396	0.470	0.414	0.443	0.508	0.496	...
...	0.446	0.457	0.430	0.404	0.430	0.480	0.509	...
...	0.433	0.465	0.430	0.422	0.436	0.433	0.508	...
...	0.466	0.515	0.425	0.398	0.426	0.484	0.443	...
...	.	.	.	.	.	.	.	...
...	.	.	.	.	.	.	.	...

Figura 29. Partes das matrizes imagens da tomografia mostrada na figura 28, quando úmida (a) e seca (b) e das matrizes densidade (c) e umidade (d).

Nas figuras 29 c) e d) são mostrados os resultados das densidades e das umidades, referentes à essa mesma região central, conforme procedimento de cálculo descrito no capítulo 4.

Neste exemplo, obteve-se matrizes de ordem 26x76 e cada elemento representa um pixel de $2 \times 2 \text{ mm}^2$. A ordem da matriz é definida em função do tamanho da amostra e da resolução pretendida.

Essa amostra de solo, possui uma densidade e umidade bastante homogêneas, pois foi preparada com solo seco e peneirado, usando um recipiente de acrílico de dimensões $25 \times 25 \times 50 \text{ mm}^3$.

As figuras 30 a) e b) apresentam as distribuições de frequências dos dados das figuras 29 a) e b). Os resultados mostram uma dispersão de aproximadamente 60 UM, em torno dos valores médios, que no caso são estatisticamente idênticos às suas modas. Essas dispersões são devidas à oscilação eletrônica do sistema, comportamento estatístico e espalhamento da radiação.

As variâncias, tanto nos dados da matriz da amostra úmida como da seca, foram de aproximadamente 2%.

A figura 31a) mostra um perfil médio de UM, para as duas imagens. Esses dados não revelam variações significativas, o mesmo ocorrendo com os perfis médios de densidades e umidades da amostra (figura 31b).

a)

b)

Figura 30. Distribuições de frequências dos dados das figuras 29 a) e b), para a amostra úmida (a) e seca (b), respectivamente.

a)

b)

Figura 31. Perfil das UM (a), densidades e umidades (b), relativos às imagens da figura 28.

5.2.1. Dependência linear entre UM, Ds e Θ

Nas figuras 32a e 32b pode-se observar uma dependência linear entre UM, Ds e Θ . Esses resultados confirmam a linearidade mostrada na eq.(27), quando um dos parâmetros Ds ou Θ for mantido constante e o solo não for expansivo.

5.3. Estudo da compactação de solos por tomografia

5.3.1. Finas camadas de solo compactado (laboratório)

A figura 33 mostra as tomografias de duas amostras de solo com finas camadas de solo compactado, de 4 e 8 mm.

Devido ao tipo de apresentação gráfica da matriz imagem, que é de pontos aleatórios num pixel com escala variável, esta não fornece uma boa definição visual da lâmina compactada. No entanto, através da quantificação em perfis (figura 34) pode-se analisar de uma forma mais segura, as regiões compactadas das amostras.

As densidades das camadas foram de 1,49; 1,46 e 1,33 g/cm³ para as camadas de 8, 4 e 2 respectivamente. As diferenças nos valores da densidade são devidas às variações de construção das amostras, artefatos gerados entre regiões com mudanças abruptas nos coeficientes de atenuação e resolução, já que neste caso a resolução foi de 2 mm.

a)

b)

Figura 32. Correlação entre UM, a densidade (a) e a umidade do solo (b).

Figura 33. Imagens de duas amostras de solo com finas camadas de solo compactado.

Figura 34. Perfis médios de UM, de amostras com finas camadas compactadas (figura 33).

5.3.2. Compactação por compressão estática (laboratório)

Na tabela III são apresentados os resultados para cada recipiente, da densidade média inicial, da umidade e da densidade média após a compressão por uma pressão de 0,8 MPa. A figura 35 mostra as imagens das seções transversais de cada amostra e a figura 36 mostra um gráfico da densidade média final pela umidade, com os dados da tabela III.

Tabela III. Resultados obtidos por gravimetria para amostras compactadas pelo teste de proctor (máxima compactação).

RECIPIENTE N.	DENSIDADE INICIAL (g/cm ³)	UMIDADE (g/g)	DENSIDADE FINAL (g/cm ³)
1	1,041	0,08	1,189
2	1,036	0,10	1,307
3	1,040	0,20	1,578
4	1,051	0,30	1,541
5	1,056	0,36	1,522

Neste gráfico pode-se observar que a densidade do solo aumenta com o teor de água até atingir um máximo e depois decresce. Isso ocorre, pois a estabilidade dos agregados diminui com o aumento de umidade no solo e assim para uma dada pressão existe uma certa umidade (umidade de compactação máxima), na qual todos os poros saturam com a compactação. Aumentando ainda mais a umidade, a água será expelida do recipiente e

Intensidade Máxima = 2431

Intensidade Máxima = 3055

Intensidade Máxima = 3321

Intensidade Máxima = 3335

Intensidade máxima = 3290

Figura 35. Imagens de amostras de solo LVE-São Carlos, compactadas com vários teores de água.

Figura 36. Gráfico da densidade média final (medida por gravimetria) e a umidade de amostras de solo compactadas por uma pressão de 0,8 MPa.

Figura 37. Processo de compactação com carga constante e várias umidades, evidenciando a máxima compactação.

conjuntamente com esta, partículas de solo. Deste modo a densidade média final decresce. Este processo descrito, é esquematizado na figura 37.

Isso é equivalente a se manter uma determinada umidade constante e se aumentar a pressão. Neste caso também existirá uma pressão na qual a densidade média final será máxima, devido à acomodação da água nos poros. A partir desta pressão haverá também diminuição da densidade devido à perda de massa.

Os resultados obtidos pela quantificação das imagens por tomografia computadorizada em perfis, são apresentadas na figura 38. Nela pode-se observar os gradientes de densidades e o alcance das pressões transmitidas ao longo da amostra.

Os gradientes de densidades são em primeira aproximação, linhas retas.

Para o solo seco ao ar e com umidade inicial de 10% , os gradientes são retas paralelas e o alcance menor que o comprimento da amostra. Quando o alcance ultrapassa o comprimento total da amostra (curvas referentes às umidades 20, 30 e 36%) as retas mudam a inclinação. Para as umidades de 30 e 36% houve perda de massa e portanto houve uma deformação da amostra próximo ao contato solo-compactador, como pode ser observado na figura 38.

Figura 38. Quantificação dos perfis, em termos de densidade do solo, de amostras compactadas com várias umidades e pressão de 0,8 MPa.

5.3.3. Compactação por compressão de implementos (campo)

Analisando-se amostras de solo coletadas após a passagem de sulcadores em várias condições de umidade e estrutura do solo, obteve-se aumentos de densidade na direção de propagação das pressões, desde 0,08 g/cm³ até praticamente zero, dependendo das condições físicas do solo e forma de utilização do implemento em cada experimento.

Primeira amostragem (Araras - set/87)

Coletou-se as amostras numa área de tráfego intenso após a passagem de um sulcador. A densidade média do solo estava em torno de $1,65 \text{ g/cm}^3$ e a umidade em torno de $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. A figura 39 mostra a quantificação num perfil médio da matriz imagem de uma das amostras coletadas, a qual como se vê, não apresenta nenhuma tendência significativa de aumento da densidade do solo.

Figura 39. Perfil de densidades numa amostra coletada após a passagem de um sulcador (1ª amostragem).

Segunda amostragem (Araras - jan/88)

As amostras foram coletadas numa área já

preparada para o plantio de cana de açúcar, cuja densidade e umidade do solo estavam em torno de $1,35 \text{ g/cm}^3$ e $0,13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ respectivamente.

Na figura 40, vê-se a quantificação do perfil de densidades de uma dessas amostras. Nela observa-se um gradiente negativo no perfil, desde a extremidade esquerda (contato solo-implemento) até a extremidade direita da amostra. Na tabela IV encontram-se os resultados das análises das outras amostras coletadas. O aumento médio de densidade no perfil foi de $0,07 \text{ g/cm}^3$.

Terceira amostragem (Araras - ago/88)

Neste experimento a densidade e a umidade média do solo estavam em torno de $1,52 \text{ g/cm}^3$ e $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ respectivamente.

O resultado gráfico da quantificação do perfil de uma amostra está mostrado na figura 41. Os resultados dos aumentos de densidade causados nas outras amostras coletadas, são apresentadas na tabela V.

Analisando esses resultados, observa-se um aumento de densidade na região que esteve em contato com o sulcador. O alcance da compactação foi de aproximadamente 20 mm e o aumento médio foi de $0,08 \text{ g/cm}^3$.

Figura 40. Perfil de densidades numa amostra coletada após a passagem de um sulcador (2a. amostragem).

Figura 41. Perfil de densidades numa amostra coletada após a passagem de um sulcador (3a. amostragem).

Tabela IV. Resultados das quantificações dos perfis de densidade das amostras coletadas após a passagem de um sulcador no solo (2a. amostragem).

AMOSTRA N.	DENSIDADE MÉDIA (g/cm ³)	UMIDADE MÉDIA (cm ³ /cm ³)	DENSIDADE MAXIMA (g/cm ³)	AUMENTO DENSIDADE (g/cm ³)
1	1,321	0,162	1,386	0,08
2	1,361	0,100	1,465	0,08
3	1,387	0,100	1,437	0,05
4	1,242	0,157	1,327	0,06
5	1,283	0,125	1,341	0,05
6	1,284	0,136	1,397	0,09
7	1,274	-	1,341	0,08
8	1,276	-	1,319	0,03

Tabela V. Resultados das quantificações dos perfis de densidade, das amostras coletadas após a passagem de um sulcador no solo (3a. amostragem).

AMOSTRA N.	DENSIDADE MÉDIA (g/cm ³)	DENSIDADE MAXIMA (g/cm ³)	AUMENTO DENSIDADE (g/cm ³)
1	1,52	1,58	0,06
2	1,65	1,73	0,08
3	1,56	1,63	0,07
4	1,51	1,51	0,00
5	1,52	1,52	0,00
6	1,53	1,62	0,09

5.3.4. Tomografia vs Penetrômetro

A figura 42 mostra os resultados da análise das amostras da trincheira 1. O perfil de densidade representa uma média dos perfis densidade na tomografia a cada 2 mm. Nota-se uma região compactada com $D_s = 1,5 \text{ g/cm}^3$ em torno de 5 cm. A partir desta profundidade a densidade decresce de uma forma aproximadamente linear.

Para as sondagens com o penetrômetro ao lado da trincheira, observa-se que a umidade influencia sensivelmente o espectro do penetrômetro. Quanto mais úmido o solo, mais mascarada fica a região compactada e quanto mais seco este solo, mais o perfil do penetrômetro se assemelha ao da densidade do solo pela tomografia.

Os resultados obtidos da trincheira 2 (figura 43) mostram também uma região compactada com $1,5 \text{ g/cm}^3$, a partir de 12 cm. A partir daí, ocorre um decaimento aproximadamente linear da densidade com a profundidade, como na trincheira 1.

Comparando os dados obtidos na trincheira 1 com os da trincheira 2, observa-se uma certa variabilidade entre os perfis de densidades, mas uma mesma tendência dos dados. A diferença desses resultados podem ser atribuídos à variabilidade da área e à diferença de nível das superfícies das duas trincheiras, já que foi necessário se retirar uma camada de aproximadamente 15 cm da superfície, por estar com muito mato.

Figura 42. Perfil de densidades na trincheira 1 com a TC e impactos por decímetro com penetrometro, para várias umidades.

Figura 43. Perfil de densidades na trincheira 2 com a TC e impactos por decímetro com penetrômetro.

6. CONCLUSÕES

Para avaliar se os objetivos foram alcançados, discutir as implicações do trabalho e a importância da metodologia desenvolvida, são feitas os seguintes comentários :

a) A TC é uma técnica que permite o cálculo da distribuição de densidades numa seção transversal (ou no volume) do solo. Como foi mostrado na seção 2.2, são bastante conhecidas as relações de distribuição de pressões no solo através de medidas com "strain-gage", mas as relações pressão-deformação são conhecidas apenas empiricamente numa amostra de solo (somente o seu valor médio). A TC abre a possibilidade da obtenção de relações pressão-distribuição de deformações (especialmente), como por exemplo as curvas da figura 38, tornando possível um entendimento mais completo do processo de compactação do solo.

b) A resolução espacial da imagem tomográfica produzida pelo equipamento utilizado (minitomógrafo) foi da ordem de 2 milímetros, portanto a densidade e umidade do solo, podem ser determinadas num

elemento de volume de $(2 \times 2 \times 2)\text{mm}^3$, no interior de uma amostra de solo.

c) A variância dos elementos da imagem (pixel) em amostras homogêneas de solo com espessuras entre 30 e 100 mm foi de 2%. Para os solos utilizados isto equivale em média a um desvio padrão de 50 UM nos pixels e de $0,02 \text{ g/cm}^3$ e $0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ na densidade e umidade respectivamente.

d) Comparada com outros equipamentos ou técnicas de medida, tira-se as seguintes conclusões:

d.1) A TC é mais precisa que a técnica do penetrômetro, pois pode fornecer um perfil de densidades com precisão de milímetros ao passo que o penetrômetro fornece um perfil de impactos por decímetro com precisão de vários centímetros. O perfil de impactos por decímetro é altamente dependente da umidade do solo, mas a medida que o solo torna-se seco este se aproxima do perfil de densidades. No entanto, o penetrômetro possui a vantagem de fornecer uma medida rápida no próprio campo, de ser facilmente manuseado e ter um preço bastante acessível.

d.2) Comparado com métodos gravimétricos, a primeira vista parece ser menos preciso, pois medidas de massa e volume podem ser feitas com bastante precisão. No entanto, deve-se levar em conta a confiabilidade e a representatividade da amostragem, já que com a TC é possível analisar-se amostras realmente indeformadas e

gravimetricamente quase sempre a amostra é perturbada. Outra vantagem da TC é a resolução, pois esta é de milímetros e na gravimetria dificilmente é melhor que 5cm e finalmente a TC possibilita a obtenção de informações sobre o interior da amostra, enquanto que a gravimetria fornece valores médios.

e) Para o sistema de medida utilizado, a imagem apresentada na tela do computador ou na impressora não é tão importante, pois é mais fácil utilizar a matriz imagem para se quantificar a distribuição de densidade e umidade do solo.

f) Pelos gráficos da figura 32, observa-se que o coeficiente angular da reta referente à densidade é bem maior que da reta da umidade e portanto a sensibilidade para medida da densidade é maior que a da umidade. Essas sensibilidades podem ser aumentadas, usando uma fonte de raios gama de menor energia (ou raios X), de modo que os coeficientes de atenuação em massa do solo e água e conseqüentemente as inclinações das retas, sejam maiores.

g) Não foi considerado neste trabalho, a variabilidade espacial existente nos solos. No entanto acredita-se que a TC seja uma boa ferramenta para tais estudos, pois em pequena escala, pode fornecer dados não acessíveis por outras técnicas e em escala de campo pode fornecer uma boa caracterização local.

A conclusão final deste trabalho é que a TC pode ser utilizada em estudos de compactação de solos com um desempenho superior às técnicas convencionais e com isso abre-se novas perspectivas para o estudo deste processo, que é de grande relevância atualmente.

7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1) A caracterização detalhada de um perfil de densidade obtida pela TC, tal como a obtida neste trabalho, sugere que isto possa ser feito em escala de campo para se caracterizar o nível de compactação em determinadas áreas. Deste modo, um trabalho possível de ser executado e que pode trazer resultados bastante elucidantes sobre a correlação entre compactação e manejo, seria a caracterização de diversas áreas, as quais durante vários anos foram utilizadas para o plantio com manejos diferenciados. Assim, seria possível se correlacionar o estágio de compactação do solo com o tipo de manejo utilizado e o tempo de cultivo, utilizando uma técnica de medida da densidade bastante precisa e de alta resolução, comparada com técnicas convencionais.

2) Outro trabalho bastante interessante seria determinar a nível de laboratório, a influência dos fatores pressão, tipo de solo, textura e outros, no processo de compactação, tal como foi feito com a umidade.

3) Do ponto de vista do equipamento algumas modificações poderiam ser implementadas de modo que a

resolução e a precisão melhorassem e o tempo de medida diminuísse.

Para diminuir o tempo seria necessário uma fonte de raios gama com maior atividade da utilizada ou uma fonte de raios X. Atualmente há na UAPDIA-EMBRAPA um projeto, em fase final, de construção de um raio X para ser acoplado neste minitomógrafo.

A resolução pode ser melhorada fazendo-se passos menores na mesa tomográfica e espessura do feixe mais fino. Isto também já está sendo implementado no minitomógrafo da UAPDIA, de modo a se obter imagens com resolução submilimétrica.

A precisão do equipamento será melhorada em função de um bom compromisso entre uma boa resolução, estabilidade do sistema eletrônico e a utilização de energias de radiação mais baixas e atividades mais altas.

Com este novo impulso na instrumentação deste minitomógrafo, novas fronteiras se abrem para futuros estudos. Entre eles tem-se o estudo dinâmico da água no solo e a possibilidade do acompanhamento do crescimento de raízes e sua interação com a matriz do solo, água e nutrientes. Outras possibilidades seriam estudos de interação de poluentes, pesticidas, etc, com a matriz do solo, que são atualmente problemas de grande relevância.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, S.H.; GANTZER, C.J. & BOONE, J.M. Rapid non destructive bulk density and soil water content determination by computed tomography. Soil Science Society of America Journal, Madison, 52 : 35-40, 1988.
- BACCHI, O.O.S. Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar. Piracicaba, ESALQ, 1976. 67p. Tese Mestrado.
- BARATA, F.E. Propriedades mecânicas dos solos: uma introdução ao projeto de fundações. Rio de Janeiro, LTC, 1984. 152p.
- BARROS, S.T. Deflection factor charts for two and three layer elastic system. Highway Research Record, 145 : 83-108, 1966.
- BATEMAN, H.P. Effect of field machine compaction on soil physical properties and crop response. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 6 : 19-25, 1963.

BOLLING, I.H. How to predict the soil compaction of agricultural tires. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL DYNAMICS, Auburn, Alabama, 1985. Proceedings... Auburn, USDA-ARS, 1985. v.5, p.6-52.

BROWN, J.M.; FONTENO, W.C.; CASSEL, D.K. & JOHNSON, G.A. Computed tomography analysis of water distribution in three porous media. Soil Science Society of America Journal, 51 : 1121-5, 1987.

CAMPBELL, D.J.; DICKSON, J.W.; BALL, B.C. & HUNTER, R. Controlled seedbed traffic after ploughing or direct drilling under winter barley in Scotland, 1980-84. Soil Tillage Research, 8 : 3-28, 1986.

COHRON, G.T. Forces causing soil compaction. In : COMPACTION of agricultural soils. St. Joseph, ASAE, 1971. cap.4, p.106-22. (ASAE Monography).

COMPACTAÇÃO do solo já é problema limitante. Noticiário CPAC, Planaltina, (111) : 1-2, 1985.

COOPER, A.W.; VANDEN BERG, G.E.; MCCOLLY, H.F. & ERICKSON, A.E. Strain gage cell measures soil preassure. Agricultural Engineering, St. Joseph, 38 : 232-5, 46, 1957.

CORMACK, A.M. Representation of a function by its line integrals with some radiological applications. Journal of Applied Physics, New York, 34 : 2722-7, 1963.

CORMACK, A.M. Representation of a function by its line integrals with some applications II. Journal of Applied Physics, New York, 35 : 2908-13, 1964.

— CRESTANA, S. A tomografia computadorizada como um novo método para estudo da física da água no solo. São Carlos, USP-IFQSC, 1985. 140p. Tese Doutorado-Física aplicada.

CRESTANA, S.; CESAREO, R. & MASCARENHAS, S. Using a computed miniscanner in soil science. Soil Science, Baltimore, 142 : 56-61, 1986.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. & POZZI-MUCELLI, R.S. Statical and dynamical three dimensional studies of water in soil using computed tomography scanning. Soil Science, Baltimore, 140 : 326-32, 1985.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CESAREO, R. & CRUVINEL, P.E. Soil research opportunities using X-ray and gamma-ray computed tomography techniques. In: RUIDOSO INTERNATIONAL CONFERENCE, Ruidoso, Novo México, May 22-25, 1988. Proceedings... Ruidoso, s.ed., 1988. p.121-8.

— CRUVINEL, P.E. Minitomógrafo de raio-X e raio-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares. Campinas, UNICAMP-FEE, 1987. 329p. Tese Doutorado.

- FERNANDES, J. Subsolação no controle da compactação de um solo na cana soca variedade CB 41-76 e seus efeitos no rendimento agrícola e no sistema radicular. Piracicaba, ESALQ, 1979. 158p. Tese Doutorado.
- FERRAZ, E.S.B. & MANSELL, R.S. Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods. Flórida, IFAS, 1979. 51p. (IFAS Technical Bulletin, 807).
- FREITAG, D.R. Methods of measuring soil compaction. In: COMPACTION of agricultural soils. St. Joseph, ASAE, 1971. 471p. (ASAE Monography).
- GAMEDA, S.; RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E. & THERIAULT, R. A review of subsoil compaction and crop response. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL DYNAMICS, Ausburn, Alabama, 1985. Proceedings... Ausburn, USDA-ARS, 1985. v.5, p.970-8.
- GUPTA, S.C.; HADAS, S.; VOORHEES, W.B.; WOLF, D.; LARSON, W.E. & SCHNEIDER, E.C. Field testing of a soil compaction model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL DYNAMICS, Ausburn, Alabama, 1985. Proceedings... Ausburn, USDA-ARS, 1985. v.5, p.979-94.
- HAINSWORTH, J.M. & AYLMOORE, L.A.G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. Australian Journal of Soil Research, Victoria, 21 : 435-40, 1983.

HENDEE, W.R. The physical principles of computed tomography. Boston, Little & Brown, 1983. 192p.

HENDEE, W.R. Medical radiation physics. 2.ed. Chicago, Year Book Medical Publishers, 1984. 517p.

HERMAN, G.T. Image reconstruction from projections: the fundamentals of computerized tomography. New York, Academic Press, 1980. 316p.

HERRIS, W.L. The soil compaction process. In: COMPACTION of agricultural soils. St. Joseph, ASAE, 1971. cap.2, p.9-44. (ASAE monography).

HOOPKINS, F.F.; MORGAN, I.L.; ELLINGER, H.D.; KLINKSIEK, R.V.; MEYER, G.A & THOMPSON, J.N. Industrial tomography applications. IEEE Transactions on Nuclear Science, New York, (28) : 1717-20, 1981.

HOUNSFIELD, G.N. A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X or gamma-radiation. London, EMI, 1972. (British Patent, 1283915. Application filed Aug. 1968).

HOVANESIAN, J.D. & BUCHELE, W.F. Development of a recording volumetric transducer for studying effects of soil parameters on compaction. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 2 : 78-81, 1959.

- HVORLEV, M.J. Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes. New York, ASCE, 1949. 521p.
- JANSSEN, P.D. & HEYERDAHL, P.H. Soil column descriptions from X-ray computed tomography density images. Soil Science, 146(2) : 102-7, 1988.
- JOHNS, H.E. & LAUGHLIN, J.S. Interaction of radiation with matter. In: HINE, G.J. & BROWNELL, G.L. Radiation dosimetry. 2.ed. New York, Academic Press, 1982. 932p.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia : relações solo-planta. São Paulo, CERES, 1979. 262p.
- LANDINA, M.M. & KLEVENSK, I.L. Effect of soil compaction and composition of soil air. Soviet Soil Science, Washington, 16(3) : 46-54, 1984.
- LAMBE, T.W. The engineering behavior of compacted clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. A.S.C.E., 84(SM2) : 1655.1-1655.35, 1958.
- LAUNDRE, J.W. Estimating soil bulk density with expanding polyurethane foam. Soil Science, Baltimore, 147 (3) : 223-4, 1989.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; JOSE, C. & BAZZA, M. An approximate method of estimating soil water diffusivity for different soil bulk densities. Water Resources Research, Washington, 18(1) : 177-81, 1982.

MCKIBBEN, E.G. Introduction. In: COMPACTION of agricultural soils. St. Joseph, ASAE, 1971. cap.1, p.3-6 (ASAE Monography).

MANTOVANI, E.C. A soil surface traffic-corn yield model for a soil under cerrado vegetation in Brazil with less than 10 years of cultivation. St. Joseph, ASAE, 1984, 15p. (ASAE Paper, 84-1546).

MARCOS, Z.Z. Ensaio sobre epistemologia pedológica. Cahiers ORSTOM, Ser. Pédologie, 19 : 5-28, 1982.

MITCHELL, J.K.; HOOPER, D.R. & CAMPANELLA, R.G. Permeability of compacted clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. A.S.C.E., 91(SM4) : 41-65, 1965.

NIMMO, J.R. & AKSTIN, K.C. Hydraulic conductivity of a sandy soil a low water content after compaction by various methods. Soil Science Society of America Journal, Madison, 52 (2) : 303-10, 1988.

NOGUEIRA, J.B. Mecânica dos solos. São Carlos, USP-EESC, 1988. 197p.

- OLDENDORF, W. Isolated flying spot detection of radiodensity discontinuities-displaying the internal structural pattern of a complex object. IRE Transactions of Biomedical Electronics, 8 : 68-72, 1961.
- ONOE, M. ; TSAO, J.W.; YAMADA, H.; NAKAMURA, H.; KOGURE, J.; KAWAMURA, H. & YOSHIMATSU, M. Computed tomography for measuring annual rings of a lives trees. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Amsterdam, 221 : 213-20, 1984.
- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E. & RIEKE, P.E. Soil bulk density in three dimensions by computed tomography scanning.. Soil Science Society of America Journal, Madison, 46 : 445-50, 1982
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. A influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 10 : 91-5, 1986.
- SIMMONS, F.W. & CASSEL D.K. Cone index and soil physical property relationships on a sloping paleaudent complex. Soil Science, Baltimore, 147 (1) : 40-6, 1989.
- SOHENE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural Engeneering, St. Joseph, 39 : 276-81, 290, 1958.

STEINHARDT, G.C. Soil compaction : a hidden problem. Trad. de T. Yamada. Informações Agronômicas, Piracicaba, 21 : 1-3, 1980.

VANDEN BERG, G.E.; COOPER, A.W.; ERICKSON, A.E. & CARLETON, W.M. Soil preassure distribution under tractor and implement traffic. Agricultural Engineering. St. Joseph, 38 : 854-5, 9, 1957.

VANDEN BERG, G.E. & GILL, W.R. Preassure distribution between a smooth tire and the soil. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 5 : 105-7, 1962.

VOMICIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 4 : 242-6, 1961.