

COMPORTAMENTO DE UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO, TEXTURA
ARGILOSA, QUANDO SUBMETIDO A DIFERENTES ENERGIAS DE
COMPACTAÇÃO

Adolar Francisco Adur

Dissertação apresentada como um dos requisitos para
obtenção do Grau de Mestre em Agronomia, Área de
Concentração em Ciência do Solo, do Setor de Ciências
Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Curitiba
Dezembro, 1990


1/
Engenheiro Agrônomo (UFPr - EMATER-PR)




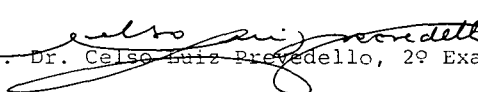
P A R E C E R

Os Membros da Comissão Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentado pelo candidato ADOLAR FRANCISCO ADUR, com o título: "COMPORTAMENTO DE UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO, TEXTURA ARGILOSA, QUANDO SUBMETIDO A DIFERENTES ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO", para obtenção do grau de Mestre de Agronomia - Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela **APROVAÇÃO** da Dissertação, com o conceito "**A**", completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo"**.

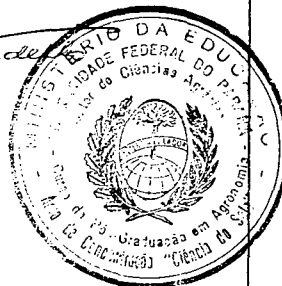
Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba, 21 de dezembro de 1990.


Prof. Dr. Marcos Luiz de Paula Souza, Presidente.


Engº Agrº Ph.D. Renato Antonio Dedecek, 1º Examinador.


Prof. Dr. Celso Luiz Prevedello, 2º Examinador.

Visto: 
Prof. Dr. Celso Luiz Prevedello
Coordenador do Curso



AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcos Luiz de Paula Souza, pelos ensinamentos constantes, apoio decisivo e orientação segura.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela transferência de ensino, experiência e dedicação.

Ao Eng. Agrônomo Mauricio Amaral pelo auxílio prestado no trabalho de campo.

A EMATER-Pr. pelas condições oferecidas para que a conclusão do curso fosse possível.

Ao companheiro Eng. Agrônomo Claus Magno Germer, pela oportunidade oferecida, quando Secretário da Agricultura.

A minha esposa Jane e aos meus filhos Caroline e Marcelo, pela compreensão, apoio e estímulo.

COMPORTAMENTO DO LATOSSOLO VERMELHO ESCURO, TEXTURA
ARGILOSA, QUANDO SUBMETIDO A DIFERENTES ENERGIAS DE
1/
COMPACTAÇÃO

Autor: Adolar Francisco Adur
Orientador: Prof: Marcos L. de Paula Souza

RESUMO

Através de um aparelho compactador (PROCTOR, modificado) em condições de campo submeteu-se, um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, após a eliminação da camada superficial (10 cm), a quatro energias de compactação (2,45; 4,90; 7,35 e 9,80 J/cm²) em várias épocas do ano para que os ensaios fossem realizados dentro da maior amplitude possível de umidade.

Os efeitos resultantes das quatro energias e de uma testemunha foram avaliados através de determinação da densidade e umidade gravimétrica do solo em três camadas (10 a 15, 15 a 20 e 20 a 25 cm), e resistência à penetração na superfície compactada. Para um dos estados de umidade mais representativo (38 a 40%) foi determinada a água retida a 0,06; 0,33; 1,0; 3,0 e 15 atm; porosidade total; macro e microporosidade das amostras.

Os dados obtidos originaram as correlações de: a) densidade global versus umidade gravimétrica; b) índice de cone versus umidade gravimétrica; c) densidade do solo versus índice de cone.

As interpretações dos dados mostraram que para todas as energias aplicadas e umidades observadas:

- a) Existem duas relações lineares distintas e inversas entre densidade global e umidade gravimétrica, sendo a intersecção das retas a umidade ótima para compactação do solo e que variou entre 34 e 36%.
- b) A resistência à penetração apresentou relação linear com a umidade do solo.
- c) A relação entre o índice de cone e a densidade global somente foram significativos para umidades acima da umidade ótima de compactação, limitando a eficiência do uso de penetrômetros para este estado de umidade do solo.

1/

Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (84 p.) - Dezembro, 1990.

BEHAVIOR OF A CLAYEY DARK RED LATOSSOL WHEN
1/
SUBMITTED TO DIFFERENT COMPACTIVE ENERGIES

Author: Adolar Francisco Adur
Adviser: Marcos L. de Paula Souza

SUMMARY

A clayey Dark Red Latossol, whose top 10 cm was removed, was submitted to four compactive energies (2,45; 4,90; 7,35 e 9,80 J/cm²) in-situ, by a modified Proctor apparatus. This was done at several times throughout one year in order to obtain a wide amplitude in moisture contents.

The effects of the four energies were evaluated by bulk density and gravimetric water content at three depths (10-15, 15-20 and 20-25 cm), and by penetration resistance at the surface. The same measurements were also done on the untreated soil. For one of the more representative soil water contents (38 to 40%), it was also determined the water held at 0,06; 0,33; 1,0; 3,0 and 15 atm; total porosity; macro and microporosity of the samples.

The data obtained allowed to correlate: (a) bulk density vs. gravimetric water content, (b) cone index vs. gravimetric water content, (c) bulk density vs. cone index.

Interpretation of the data indicates that, for all energies and water contents:

(a) There exist two distinct linear relations between bulk density and gravimetric water content. The intersection of both is the optimum water content for compaction, which varied between 34 and 36%.

(b) Penetration resistance had a linear relation with water content.

(c) The relation between cone index and bulk density was significant only for water contents above optimum for compaction, limiting the efficient use of penetrometers to this moisture range.

1/

M.Sc. Dissertation in Soil Science, Faculty of Agronomy, Federal University of Paraná, Curitiba (84 p.) - December, 1990.

BIOGRAFIA

Adolar Francisco Adur, filho de Miguel Adur e Alví-
na Guimarães Adur, nasceu aos vinte e três dias do mês de
setembro de um mil e novecentos e quarenta e nove, no
município de São Mateus do Sul, Paraná.

Em dezembro de 1975, graduou-se em Engenharia
Agronômica pela Universidade Federal do Paraná.

Em janeiro de 1976, iniciou sua carreira profissio-
nal como extensionista da EMATER-Paraná, no município de
Rolândia, na área de Conservação do Solo.

Em 1979 assumiu a Coordenação da Área de Recursos
Naturais, no Escritório Regional da EMATER em Toledo, onde
coordenou o início dos trabalhos de Conservação do Solo em
Microbacias Hidrográficas.

Em 1981 assumiu a Chefia Regional da EMATER-Paraná
na Região de Campo Mourão.

Em 1983 assumiu a Coordenação Estadual do Programa
de Manejo Integrado de Solos e Água do Paraná - PMISA, na
Secretaria da Agricultura do Paraná.

Em 1985 assumiu no Escritório Central da EMATER-
Paraná a função de Extensionista Estadual da Área de Recur-
sos Naturais, onde permanece até hoje.

SUMÁRIO

	página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Compactação do solo	3
2.1.1. Conceitos	3
2.1.2. Processos de compactação do solo	4
2.1.3. Causas e efeitos da compactação	7
2.1.4. Determinação da compactação	15
2.1.4.1. Densidade do solo	15
2.1.4.2. Resistência à penetração	17
3. MATERIAIS	19
3.1. Descrição geral da área de estudo	19
3.1.1. Localização	19
3.1.2. Clima	19
3.1.3. Solo	20
3.2. Equipamentos utilizados	22
3.2.1. Compactador	22
3.2.2. Coletor de amostras	24
3.2.3. Penetrômetro	25
4. MÉTODOS	27
4.1. Delineamento experimental	27
4.2. Compactação das parcelas	27
4.3. Resistência à compactação	28
4.4. Coleta de amostras	29
4.5. Métodos analíticos	29
4.5.1. Determinação da umidade gravimétrica ..	29
4.5.2. Densidade global	30
4.5.3. Densidade de partículas	30
4.5.4. Porcentagem total de poros calculados ou Porosidade Total	30
4.5.5. Macroporosidade	30
4.5.6. Microporosidade	30
4.5.7. Retenção de água	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1. Efeito da compactação nas propriedades físi- cas do solo	32
5.2. Variação da densidade global do solo em fun- ção da umidade e da energia aplicada	36

5.2.1. Energia Zero (E_0)	52
5.2.2. Energias E_1 , E_2 , E_3 , e E_4	53
5.3. Resistência à penetração	55
5.4. Interação entre energia, resistência à penetração, densidade e umidade	55
6. CONCLUSÕES	65
7. RECOMENDAÇÕES	67
8. BIBLIOGRAFIA	69
9. ANEXOS	71

RELAÇÃO DE QUADROS

	páginas
01. Resultados analíticos para caracterização granulométrica das amostras.....	21
02. Resultado da análise química de uma amostra da área experimental	21
03. Composição mineralógica (SANTOS FILHO, 1977) do Latossolo Vermelho Escuro	22
04. Energias aplicadas nos ensaios de compactação.	24
05. Variação da retenção de umidade, densidade global e porosidade do solo, submetido a diferentes energias de compactação	33
06. Pontos de intersecção (PI) e pontos de umidade ótima (UO) para compactação em cada energia ..	34

RELAÇÃO DE FIGURAS

	páginas
01. Aparelho compactador (PROCTOR modificado)	23
02. Conjunto coletor de amostras	26
03. Distribuição espacial das parcelas e local das parcelas	28
04. Efeito em profundidade na densidade global do solo em função da aplicação de diferentes energias	36
05. Variação da porosidade em função da energia no solo com 39% de umidade (1ª camada)	37
06. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 1 (Energia 0)	39
07. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 2 (Energia 0)	39
08. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 3 (Energia 0)	40
09. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade nas três profundidades (Energia 0)	40
10. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 1 (Energia 1)	41
11. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 2 (Energia 1)	41
12. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 3 (Energia 1)	42

13. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade nas três profundidades (Energia 1)	42
14. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 1 (Energia 2)	43
15. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 2 (Energia 2)	43
16. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 3 (Energia 2)	44
17. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade nas três profundidades (Energia 2)	44
18. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 1 (Energia 3)	45
19. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 2 (Energia 3)	45
20. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 3 (Energia 3)	46
21. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade nas três profundidades (Energia 3)	46
22. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 1 (Energia 4)	47
23. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 2 (Energia 4)	47
24. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade na profundidade 3 (Energia 4)	48
25. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade nas três profundidades (Energia 4)	48

26. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade. Gráfico comparativo entre as variações de energias na profundidade 1	49
27. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade. Gráfico comparativo entre as variações de energias na profundidade 2	50
28. Variação da densidade global em função da energia aplicada e da umidade. Gráfico comparativo entre as variações de energias na profundidade 3	51
29. Relação entre resistência à penetração (Índice de Cone-IC) e umidade (U%) na Energia 0 (1ª camada)	56
30. Relação entre resistência à penetração (Índice de Cone-IC) e umidade (U%) na Energia 1 (1ª camada)	57
31. Relação entre resistência à penetração (Índice de Cone-IC) e umidade (U%) na Energia 2 (1ª camada)	58
32. Relação entre resistência à penetração (Índice de Cone-IC) e umidade (U%) na Energia 3 (1ª camada)	59
33. Relação entre resistência à penetração (Índice de Cone-IC) e umidade (U%) na Energia 4 (1ª camada)	60
34. Variação do Índice de Cone (IC) em relação a umidade (U%) em todas as energias (valores obtidos no campo - 60 amostras)	61
35. Interações entre valores calculados de energia, resistência à penetração, densidade e umidade (1ª camada)	62

RELAÇÃO DOS ANEXOS

	páginas
01. Valores de umidade e densidade obtido a campo e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 0 - divididos em ramo úmido e molhado .	72
02. Valores de umidade e densidade obtido a campo e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 1 - divididos em ramo úmido e molhado .	73
03. Valores de umidade e densidade obtido a campo e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 2 - divididos em ramo úmido e molhado .	74
04. Valores de umidade e densidade obtido a campo e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 3 - divididos em ramo úmido e molhado .	75
05. Valores de umidade e densidade obtido a campo e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 4 - divididos em ramo úmido e molhado .	76
06. Valores corrigidos de densidade global em todas as unidades obtidas à campo e pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 0)	77
07. Valores corrigidos de densidade global em todas as unidades obtidas à campo e pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 1)	78
08. Valores corrigidos de densidade global em todas as unidades obtidas à campo e pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 2)	79
09. Valores corrigidos de densidade global em todas as unidades obtidas à campo e pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 3)	80

10. Valores corrigidos de densidade global em todas as unidades obtidas à campo e pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 4)	81
11. Dados de resistência à penetração, umidade e densidade obtidas, em diferentes energias aplicadas no solo (valores obtidos no campo)	82
12. Dados de umidade, densidade e Índice de Cone sob diferentes energias (valores corrigidos)	83
13. Dados do penetrômetro SOLOTEST, Ref- S-210	84

1 - INTRODUÇÃO

As transformações ocorridas no Estado do Paraná em relação aos seus recursos naturais, nas últimas três décadas, trouxeram sérios problemas de degradação ambiental. Após a eliminação de praticamente toda a cobertura vegetal, que exercia importante papel na proteção do solo, implantou-se um sistema de agricultura altamente dependente da mecanização agrícola em grande parte do Estado. Normalmente nestas áreas, implantou-se o binômio trigo-soja, com sistemas de cultivo mecanizados.

O uso de máquinas e implementos, de forma inadequada, na maioria das propriedades, provocaram grandes perdas por erosão (solo, fertilidade, etc...), tendo como uma das principais causas, apontadas por extensionistas, a compactação do solo.

Visando contribuir para o melhor entendimento do problema, o presente trabalho procurou reconstituir, de forma artificial, o processo da compactação que ocorre no campo, para avaliar alguns parâmetros que ajudem os técnicos a melhor entender o fenômeno e, juntamente com os produtores, a encontrar alternativas que levem a eliminação ou minimização do problema, contribuindo desta forma para o controle da erosão, recuperação da fertilidade e da produtividade das culturas objetivando a melhoria da renda dos

produtores rurais. Para tanto buscou-se correlacionar as variações sofridas pelo solo, quanto à: densidade, porosidade e resistência à penetração, quando submetido a diferentes energias e umidades.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - COMPACTAÇÃO DO SOLO

2.1.1 - Conceitos

A compactação é uma propriedade complexa do solo que compreende interações de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, assim como do clima, das práticas agrônômicas e do tipo de cultivo. Além do termo compactação, vários autores citam ainda adensamento e compressão para definirem um estado de compactação do solo.

BAVER & GARDNER (1973) definem compactação como sendo o aumento de densidade de um solo como resultado de cargas ou pressões aplicadas. Em outras palavras, a compactação é definida por eles como um comportamento dinâmico do solo pelo qual o estado de compactação aumenta. Já BRADFORD & GUPTA (1976), definem compactação como sendo o processo que causa alteração do volume do solo pela aplicação momentânea de carga sobre ele.

O adensamento do solo é definido por BAVER & GARDNER (1973) como sendo a redução de volume específico aparente (razão de vazios) em um solo, causado por trabalho mecânico. A razão de vazios diminui quando a umidade aumenta para uma mesma carga aplicada. O adensamento, portanto,

é uma mudança estrutural associada a consistência do solo.

O termo **compressão** é definido por ROLOFF (1986) como sendo a redução do volume do solo causada por uma carga externa, ocorrendo primariamente devido a exclusão do ar e da água dos espaços porosos e ao arranjo das partículas do solo e secundariamente devido a compressão e deformação do ar e da água nos poros. BAVER & GARDNER (1973) citam compressão como sendo variação do volume de um solo sob esforço aplicado. Como o volume do solo consta de uma fase sólida e dos vazios que os compõem, a compressão apresenta decréscimo na razão dos vazios do solo pelo incremento de cargas ou de pressão aplicadas. A compressão aumenta com a umidade alcançando um valor máximo para logo em seguida começar a diminuir a medida que aumenta a umidade. Este máximo ocorre dentro da zona plástica, indubitavelmente como resultado da crescente facilidade com que as partículas se orientam acima do limite plástico.

2.1.2 - Processos de compactação do solo

As forças que causam a compactação do solo originam-se de duas fontes: natural e mecânica. As forças naturais são difíceis de definir e avaliar, agindo no solo lentamente. CAMARGO (1983), afirma que os fatores naturais ou genéticos, são derivados da evolução do solo. São materiais muito finos que ao serem arrastados da superfície do solo preenchem parte dos poros das camadas inferiores. O processo de secagem e umedecimento em certas posições

topográficas também podem causar compactação no sub-solo. As forças mecânicas originam-se, segundo BELTRAME et alli (1981), da pressão causada pelas máquinas e implementos sobre o solo. Por sua vez a pressão é resultado das forças de tração e do próprio peso do trator e dos implementos. A resistência do solo às forças aplicadas está diretamente relacionada com o conteúdo de matéria orgânica do mesmo. Apesar destas diferentes causas e fatores, a umidade do solo no momento da aplicação de forças é o fator determinante neste processo. O mesmo autor cita ainda que a compactação, causada pela pressão dos pneus do trator sobre o solo, tem efeito imediato e ocorre com maior intensidade pouco abaixo da camada arável (15 a 40 cm). A compactação ocorrida acima da profundidade de trabalho é eliminada pela aração, o que não ocorre nas operações de plantio, tratamentos culturais e colheita.

VIANA (1988), ao comparar em laboratório as curvas de compactação no mesmo Latossolo Vermelho Escuro do presente estudo, usando níveis iguais de energia em duas profundidades (0 a 10 e 15 a 25 cm), constatou forte influência da matéria orgânica na compactação do solo. Enquanto na primeira camada (onde os teores de matéria orgânica eram maiores) as densidades variaram de 1,165 a 1,452 gr/cm³, na segunda camada a variação foi de 1,197 a 1,556 gr/cm³.

CINTRA (1980) afirma que a intensidade da compactação causada por forças mecânicas ocorre em períodos curtos de tempo e depende fundamentalmente do manejo do solo. Sem dúvida nenhuma o uso de tratores e implementos

agrícolas tornam mais operacional e eficiente o trabalho de preparo do solo resultando em aumentos de produção. No entanto, essas máquinas são responsáveis pela deterioração mais rápida das condições físicas das extensas áreas de terra. O tráfego excessivo realizado indiscriminadamente sobre diferentes condições de solo é o principal responsável pela compactação ocasionada por forças mecânicas, tanto pelo número exagerado de operações realizadas como pelo simples tráfego de tratores e máquinas sobre o solo cultivado. A maior ou menor resistência do solo a estas forças está na dependência direta da umidade, das características plásticas da estrutura e do conteúdo de matéria orgânica de cada tipo de solo.

A compactação do solo determina, de certa forma, as relações entre as fases sólida, líquida e gasosa. CAMARGO (1983), afirma que quando um solo é submetido à pressão, como a parte sólida é rígida e praticamente indeformável, a compactação ocorre às expensas da diminuição do volume de poros total, com conseqüente aumento da densidade global. Os poros mais facilmente afetados são os grandes (com diâmetro superior a 0,05 mm), através dos quais o movimento de ar e de água é normalmente rápido e não limitado e por onde o crescimento radicular se dá sem restrições. Para solos com boa agregação, não saturados, a mudança de volume se dá, principalmente, pela mudança de posição por rolamento ou deslizamento das partículas do solo. É importante ressaltar que durante o processo de compactação existe uma umidade ótima em que ocorre uma densidade global máxima para uma dada quantidade de energia

aplicada. Para baixo ou para cima da umidade ótima a densidade global atinge valores mais baixos.

2.1.3 - Causas e efeitos da compactação

A idéia de preparar o solo para o plantio vem de tempos remotos. As justificativas tem sido diversas, assim como tem sido diversos os equipamentos utilizados. Entretanto, na decisão do método de preparo, se não forem levados em consideração o tipo de solo, relevo, clima e espécie vegetal, além de outros fatores inerentes a cada situação, a estrutura do solo poderá ser seriamente afetada.

Sentindo a necessidade de estudar os efeitos provocados pelos diferentes sistemas de manejo, especialmente na densidade aparente, na porosidade e no diâmetro de poros, FERNANDES et alli (1982) pesquisaram dois solos cultivados continuamente com milho durante sete anos, pelos sistemas convencional, escarificação e plantio direto. Foram coletadas amostras à profundidade de 0-10, 10-20 e 20-30 cm. Os autores concluíram que os sistemas de preparo do solo afetaram os valores de densidade aparente, porosidade total e diâmetro dos poros. Dentro de um mesmo solo, as variações numéricas dos parâmetros estudados dependeram do tipo de preparo e da profundidade. De modo geral, nas duas primeiras profundidades o sistema convencional e de escarificação apresentaram os menores valores de densidade aparente e os maiores de porosidade total e de poros com diâmetro superior a 0,05 mm. No plantio direto, embora tenha apresentado os menores valores de porosidade, quando comparado com o

sistema convencional e escarificação, provavelmente devido ao arrançamento natural do solo, é de se esperar que com o passar dos anos a densidade aparente decresça devido ao aumento da matéria orgânica na parte superficial, vindo fornecer melhor desenvolvimento da estrutura do solo.

A ação de compactação do arado é bastante prejudicial quando a profundidade de aração é constante. Além dos efeitos do arado em si, existe a influência das rodas do trator ou das pisadas do animal. Estudos realizados sobre a formação de "pé de arado" demonstraram que a ação normal do arado deixa uma camada superficial solta e um sub-solo adensado, onde os agregados do solo foram compactados pelos discos ou aivecas. Microfotografias de compactação provocada pelo arado, demonstraram a existência de uma ação de fricção formando uma película de argila de alguns centímetros de espessura sobre a zona compactada. Este estado de compactação diminui a permeabilidade a tal ponto que pode impedir o crescimento da planta. BAVER & GARDNER (1973) apresentam ainda observações de vários perfis de solo preparados para semeadura, com grade niveladora de discos, onde constataram que 50 a 70% do solo mobilizado pela aração foi recompactado pela grade. Além da aração e gradagem, as operações posteriores de semeadura, tratamentos culturais, colheitas e transporte, interferiram consideravelmente na infiltração de água, aeração, desenvolvimento radicular, etc..., afetando diretamente a produtividade das culturas e favorecendo a erosão e conseqüentemente a degradação do solo.

Para melhor compreensão da compactação em estudos

de manejo de solo, fatores como a composição granulométrica, variação da umidade e o teor de matéria orgânica devem ser considerados, afim de verificar em que condições ela ocorre de maneira mais acentuada.

Segundo BELTRAME et alli (1981), os trabalhos de preparo convencional de solos provocam alterações nas propriedades físicas do solo, modificando-lhe a estrutura natural, particularmente as capinas superficiais e as gradagens com o solo seco, causando-lhe a pulverização excessiva. Estes tratos culturais mais a lavração realizados com teores elevados de umidade provocam a compactação do solo. O mesmo autor afirma ainda que a compactação provoca nas camadas sub-superficiais do solo, redução de até 1/5 na condutividade hidráulica. Esta redução provoca encharcamento por um período mais longo, reduzindo o tempo disponível para executar operações agrícolas de preparo e plantio. Além disso, ao ocorrer uma variação na umidade do solo, ocorre uma variação em sentido contrário na resistência à penetração, pois o teor de umidade intervem modificando a coesão entre as partículas que é maior no solo seco e decresce a medida em que o teor de água aumenta provocando a separação das partículas.

CINTRA (1980), em experimento no campo observou que a taxa de infiltração de água ao final de duas horas foi severamente afetado pelo cultivo. No solo sob mata, observou-se uma taxa final de infiltração de 314 mm/h, sendo que naquele sob cultivo foi de apenas 6 mm/h. Este fato deve-se, segundo o autor, ao volume de macroporos na camada de 0 a 15 cm, que no solo da mata é duas vezes maior que no solo

cultivado e uma redução muito maior (chegando a cinco vezes) na profundidade de 15 a 30 cm. Além disso, a diminuição da macroporosidade afeta o desenvolvimento das plantas por imprimir ao solo condições de baixa aeração, já que macroporosidade abaixo de 10% afeta a transferência de oxigênio para as raízes. Ainda de acordo com BELTRAME et alli (1981), 10% é o limite inferior que ocorre troca de gases entre o solo e a atmosfera, acarretando um mau suprimento de oxigênio, que associado à maior resistência à penetração causa redução do sistema radicular, refletindo-se em maior sensibilidade das plantas as pequenas estiagens e mau aproveitamento de fertilizantes.

Segundo BOWEY et alli (1985), em um estudo na Universidade Estadual de Yoha, obteve-se que a absorção de potássio (K) em milho foi reduzido em 70% em solos gravemente compactados, a absorção de nitrogênio (N) em 30%, a de magnésio (Mg) de 20% e a de cálcio (Ca) em 10%. A redução depende do tipo de solo e do grau de compactação, porém invariavelmente a absorção é afetada negativamente pela compactação do solo.

Segundo CAMARGO (1983), o tamanho dos poros determina o potencial da água neles retido e conseqüentemente a sucção necessária para esvaziá-los. Quanto maior o tamanho dos poros, menor será a sucção a ser aplicada à água para retirá-la; quanto menor o tamanho do poro, consideravelmente maior será a sucção necessária para retirar a água. O mesmo autor cita ainda que uma amostra compactada retem menos água que uma não compactada, a várias tensões. Entretanto essa relação modifica-se a tensões intermediárias,

onde a compactada retém mais água. A água retida a tensões acima de 0,1 bar é de grande interesse para o estudo da disponibilidade da água às plantas. A compactação de maneira geral aumenta a quantidade de água retida na faixa de disponibilidade para as plantas (entre 0,1 e 15 bares). O mesmo autor recomenda que é importante ter em mente que esta disponibilidade não é simples de ser interpretada, uma vez que a deficiência de aeração e a resistência mecânica do solo podem dificultar a interpretação da situação.

A taxa de infiltração de água em solos compactados, também é muito diminuída e esta condição pode trazer inconvenientes como a aeração deficiente e aumento do escoamento superficial de água que pode acelerar o carreamento de partículas do solo. Ciclos de umedecimento e secamento parecem melhorar a infiltração em solos compactados sem atingir, no entanto, a condição original do solo não compactado. A condutividade hidráulica não saturada de um solo com baixa umidade, ou seja, abaixo da capacidade de campo, é maior para um solo não compactado, o contrário do que acontece para a condutividade hidráulica saturada. Este fato acontece porque a compactação aumenta o número de poros pequenos que permanecem cheios de água quando o solo está com teor médio de água (CAMARGO, (1983)).

O não dimensionamento de tratores e implementos agrícolas para cada situação, aliado ao mau uso do solo, são apontados por VIANA (1988) como as principais causas de depauperamento do ambiente radicular e dos processos de erosão do solo e a conseqüente diminuição do potencial produtivo dos solos agrícolas.

Os trabalhos de preparo do solo destroem a estrutura natural da camada arável e, se realizados sob condições de excesso de umidade, provocam compactação, que reduzem as taxas de infiltração e aumentam o volume de escoamento superficial em solos declivosos. Nos solos planos a redução das taxas de infiltração, além de afetarem as taxas de oxigênio, refletem-se no aumento do tempo de seu encharcamento reduzindo consideravelmente o tempo para o seu preparo (BELTRAME et alli, 1981).

SILVA et alli (1986), afirmam que a utilização de equipamentos pesados e intensa mobilização do solo, e principalmente o preparo do solo realizado em condições de umidade inadequadas, vem causando em muitas regiões, sua compactação, isto é, alteração no arranjo das partículas, tornando-o mais denso. Essa compactação altera várias de suas propriedades, notadamente as relacionadas com a física do solo, como a densidade global, a porosidade e parâmetros hídricos, ocasionando com isso, alterações na maioria das vezes indesejáveis no espaço poroso do solo. Citam ainda que diferentes tipos de solos apresentam comportamentos distintos quando submetidos à compactação, por possuírem características diferentes, destacando-se entre elas a granulometria e o teor de matéria orgânica. Além disso frisam em seu trabalho que a umidade do solo é outro fator determinante no processo de compactação. No seu trabalho, a partir de amostras compactadas artificialmente de um latossolo roxo argiloso e de um latossolo vermelho-amarelo textura média, ambos sob condições de floresta e cultivo, foram elaboradas curvas de densidade global do

solo versus umidade. Observou-se o comportamento das amostras quanto ao tamanho dos poros, curva de retenção de água e condutividade hidráulica em solo saturado, quando foram compactados em níveis de densidade correspondente a densidade natural 1,25 e 1,45 g/cm³. Pelas curvas de compactação, verificou-se que o latossolo vermelho-amarelo atingiu índices de densidade maiores e que a umidade na qual se atingiu o nível máximo de compactação foi maior no latossolo roxo, notadamente sob floresta.

As amostras quando compactadas nos níveis mencionados, apresentaram em ambos os solos, uma diminuição dos poros com diâmetro menor, da percentagem de água retirada nas tensões estudadas e de água disponíveis entre 0,01 e 0,1 MPa, e um declínio da condutividade hidráulica saturada. No mesmo experimento observou-se que para a aplicação de uma mesma energia de compactação, a densidade global aumentou com a umidade até atingir o máximo. Após atingi-lo, adições superiores de água acarretam uma diminuição na densidade global, definindo como "ótimo" para compactação o teor de água onde a densidade global é máxima. O autor concluiu ainda que este teor varia de acordo com o tipo de solo, e principalmente devido a quantidade de argila e teor de matéria orgânica nele contido. Observou ainda que a medida que aumentou os níveis de compactação, os poros maiores que 0,05 mm diminuíram de 35 para 0% no latossolo roxo sob floresta, de 35 para 5% no latossolo roxo sob cultivo e de 38 para 26% no latossolo vermelho-amarelo. Essa diminuição dos poros maiores que 0,05 mm aumentou a retenção de água em todas as tensões,

chegando-se a constatar incrementos de 20% para o latossolo roxo sob floresta e de 15% sob cultivo. Esse aumento se deve ao incremento de poros menores que 0,05 mm, os quais são responsáveis por essa propriedade na faixa estudada. Esta mesma afirmação, de que o aumento do nível de compactação ocasiona um incremento na porcentagem de água disponível, em tensões de 0,01 a 0,1 MPa, também foi feita por CAMARGO (1983). Por outro lado a compactação ocasiona acentuada queda na condutibilidade hidráulica saturada, o que deve estar relacionado com a diminuição dos macroporos (SILVA et alli, 1986).

"O cultivo intensivo do solo e seu preparo em condições inadequadas alteram os fatores de crescimento das plantas. Dependendo da intensidade com que ocorram tais alterações, podem produzir condições limitantes ao desenvolvimento dos vegetais, em detrimento da produtividade, além de grandes perdas de solo por erosão hídrica". Para comprovar esta afirmação, CINTRA et alli (1980) realizaram uma pesquisa com objetivo de avaliar o grau de degradação pelo cultivo, de algumas características físicas em um latossolo roxo no planalto riograndense. Foram feitas determinações físicas, a campo e em laboratório, em solos cultivados convencionalmente por mais de quinze anos com sucessão trigo/soja e em solo sob mata. Este, quando comparado com o mesmo solo sob cultivo convencional, apresentou maior volume de macro e micro poros, maiores teores de matéria orgânica, valores mais baixos de densidade e de resistência à penetração. Conseqüentemente estes solos apresentaram maior taxa de infiltração de água, portanto menos sujeitos

à erosão.

Por outro lado, segundo o mesmo autor, as alterações provocadas pelo cultivo apontam a possibilidade de ocorrência de impedimento mecânico ao desenvolvimento radicular da cultura, degradação da estrutura e danos por erosão.

VIANA (1988), trabalhando em laboratório, com amostras deformadas, constatou que a medida que se aumentava a intensidade de energia aplicada sobre a amostra, aumentava os níveis de compactação do solo para um mesmo teor de umidade. O mesmo trabalho comprova ainda que a medida que se aumenta o nível de energia de compactação, o solo alcança o ponto de sensibilidade à compactação da argila (ponto onde se inicia o processo de compactação) com menores teores de água.

2.1.4 - Determinação da Compactação

2.1.4.1 - Densidade do solo

É difícil medir com precisão o estado de compactação de um solo. A medida da estrutura e da compactação do solo mais usada é a densidade global (massa de solo seco por unidade de volume), geralmente expressa em gramas de solo por cm^3 . A densidade global está inversamente relacionada com a percentagem de poros por unidade de volume de solo. Quanto maior for a densidade global, menor a percentagem de poros e mais compacto é o solo. As mudanças de densidade e resistência do solo são funções do seu conteúdo

de umidade. Os solos úmidos se compactam mais facilmente que os secos. Os solos de mesma densidade tem menor resistência quando seu conteúdo de umidade é alto em relação ao mesmo solo com menos umidade. A resistência do solo também aumenta a medida que a compactação aumenta, seja qual for o conteúdo de umidade (BOWEN et alli, 1985).

De acordo com FAURE (1978), o sistema mais prático para compactar um material em laboratório é o sistema PROCTOR. A energia utilizada é uma energia cinética produzida pela queda de um soquete a uma altura constante, um certo número de vezes. O valor desta energia depende então de três parâmetros independentes: massa do soquete, altura de queda e o número de golpes e impactos.

O resultado gráfico deste método é uma curva de variação da densidade em função da energia aplicada e da umidade do solo. A umidade do solo é fator fundamental na variação da densidade, apresentando comportamentos distintos de acordo com os teores de água no solo. A conformação da curva é explicada por BAVER & GARDNER, (1973) pela formação de uma dupla camada difusa e pela orientação das partículas. No ramo seco da curva (que antecede o ramo úmido), como não há água suficiente para formar uma dupla camada, a densidade é menor por que o solo está floculado e as partículas estão distribuídas ao acaso. No ramo úmido, a dupla camada se expande, as películas de água se tornam mais grossas e começam a produzir lubrificação entre as partículas, as quais se orientam de modo que deslizam uma sobre as outras, formando uma massa mais densa até o conteúdo ótimo (ponto de máxima compactação). A partir daí,

prossegue o aumento da espessura da película de água e a densidade diminui, em função do efeito diluidor da água sobre a concentração das partículas por unidade de volume (ramo molhado da curva).

2.1.4.2 - Resistência à penetração

Embora bastante controversa, a utilização de Penetrômetros e Penetrógrafos para medir resistência à penetração não deixa de ser uma forma de determinar o estado de compactação do solo, desde que observados alguns pontos básicos, principalmente a umidade. ROLOFF, (1986) cita em seu trabalho que a sensibilidade dos penetrômetros possibilita uma avaliação mais acurada dos tratamentos quando comparada à densidade do solo, pois enquanto a densidade do solo em estudo sobre preparo varia de 1,0 a 1,7 g/cm³, valores do Índice de Cone (IC) variam de 0 a 90 kg/cm².

A resistência de um solo à penetração de um instrumento de sondagem é um indicador integrado de compactação do solo, umidade, textura e tipo de mineral de argila. Em outras palavras, é um indicador da resistência do solo nas condições da medição. É uma determinação que implica na consistência e na estrutura do solo.

BELTRAME et alli (1981), mostraram estatisticamente que a densidade do solo tem maior influência que a umidade na resistência à penetração do solo. Quando variou a umidade do solo, houve variação em sentido contrário na resistência à penetração, já que a umidade intervém modificando

a coesão entre as partículas do solo. Para uma mudança na densidade, ocorreu mudança no mesmo sentido da resistência à penetração.

VIANA (1988), contestou tais afirmações demonstrando em seu trabalho que a umidade interfere mais que a densidade do solo na resistência à penetração, e afirma que para obtenção de valores seguros de resistência à penetração, os fatores mais importantes são a escolha de equipamentos corretos e a metodologia de utilização de penetrômetro ou penetrógrafo, sem esquecer que a umidade deve ser levada em consideração por ter interferência decisiva no processo.

GUERRA (1982) alerta que embora não seja uma medida direta da compactação do solo, a resistência do solo ao penetrômetro é por esta afetada, o que credencia esta prática como auxiliar na investigação de camadas compactadas, reforçando tendências fornecidas pela densidade do solo. No entanto, por ser influenciada pelos teores de umidade presentes no solo por ocasião da realização das determinações, a consideração desses teores é indispensável na análise dos resultados. Além disso, deve ser considerado ainda o tipo de solo e manejo a que ele está submetido.

3 - MATERIAIS

3.1 - Descrição Geral da Área de Estudo

3.1.1 - Localização

O experimento foi desenvolvido no Pólo Regional do IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná, no município de Ponta Grossa, situado no segundo planalto paranaense (Região Sul do Estado). A área encontra-se sobreposta ao Arenito de Furnas do Pré-Cambriano, sendo constituído por folhelhos argilosos. Selecionou-se uma área que tivesse a menor interferência possível do trânsito de máquinas ou animais nos últimos dez anos. Para tanto definiu-se por uma área próxima à sede e que sofreu apenas pisoteio de trator para corte de grama, sem no entanto sofrer revolvimento do solo. A área delimitada para estudo encontra-se em relevo praticamente plano.

3.1.2 - Clima

Segundo a classificação de Koeppen, a região onde está localizada a estação experimental apresenta clima subtropical úmido, de verões frescos (Cfb). A temperatura média anual é de 18° C. Precipitação anual na faixa de

1.500 mm e umidade relativa do ar próximo de 80% (IAPAR, 1978).

3.1.3 - Solo

Trata-se de um Latossolo Vermelho Escuro Alíco, com horizonte A proeminente, textura argilosa, fase campo subtropical, relevo plano, formados a partir de resíduos intemperizados de rochas sedimentares de natureza argilosa (EMBRAPA-SNLCS, 1984). Estes solos apresentam-se muito profundos, com transição difusa entre os sub-horizontes A11 e A12 e entre os sub-horizontes B21 e B22 enquanto que apresentam transição clara entre os sub-horizontes A12 e B1 e entre B1 e B21. A coloração dos sub-horizontes superiores é bruno avermelhado escuro (2,5YR 3/3) e a dos de sub-superfície é vermelho escuro (2,5YR 3/5). Estes sub-horizontes são muito porosos e bem drenados, com excessão do horizonte A12 que apresenta-se pouco poroso e moderadamente drenado. A sua consistência quando seco e úmido é, respectivamente, solto e muito friável em todo perfil, exceto no horizonte A12 que é ligeiramente duro e friável. A textura da unidade taxonomica é uniforme e muito argilosa em todo o perfil. A caracterização granulométrica da amostra é apresentado no quadro 01. A estrutura no sub-horizonte A11 é grumosa, média, enquanto no horizonte A12 é em blocos subangulares, médios e no horizonte B, granular, muito pequena, excessão feita ao sub-horizonte B1, que apresenta estrutura em blocos subangulares pequenos (BRASIL, M.A. 1974). A somatória dos sub-horizontes A11 e A12 totalizam 25 cm de

profundidade.

A fertilidade natural deste solo é baixa, sendo que o resultado da análise química é apresentado no quadro 02. Os resultados da análise mineralógica da unidade, de acordo com SANTOS FILHO (1977) é apresentada no quadro 03.

QUADRO 01 - Resultados Analíticos para Caracterização Granulométrica das Amostras, segundo VETTORI & PIERANTONI (1968).

Tipo de Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)
Latosolo Vermelho Escuro Alico	70	22,6	5,4	2,0

QUADRO 02 - Resultado da Análise Química de uma Amostra Composta da Area Experimental, segundo VETTORI (1969).

pH	(CaCl 0,01M)	4,5
Al	(meq/100 cm ³ de solo)	1,2
H + Al	(" ")	5,2
Ca + Mg	(" ")	2,4
Ca	(" ")	1,5
Mg	(" ")	0,9
K	(" ")	0,2
P	(ppm)	1,0
C	(%)	2,6

QUADRO 03 - Composição Mineralógica (SANTOS FILHO, 1977)
do Latossolo Vermelho Escuro Alíco (P.Grossa-
PR)

Hematita Goetita	Gibbsita	Quartzo	Caulinita	Clorita Vermiculita
Traços		Traços		
<5%	30-70%	<5%	15 a 30%	5 a 15%

3.2 - Equipamentos Utilizados

3.2.1 - Compactador

O aparelho (figura 1) foi construído especialmente para a realização do experimento no campo. Para tanto, baseou-se no aparelho PROCTOR, utilizado para compactação de amostras em laboratório, sendo necessário fazer algumas alterações na equação de cálculo da energia aplicada. (Foi considerado a superfície e não o volume compactado).

Basicamente o aparelho é constituído de uma haste de 70 cm de altura e 1,5 cm de diâmetro, fixado numa base de 10 cm de diâmetro e 2 cm de espessura. Acoplado a haste está um soquete com 9,03 kg de massa, com 15 cm de altura e 10 cm de diâmetro, perfurado no centro para que possa ser movimentado livremente guiado pela haste. O aparelho dispõe ainda de uma guia reguladora de altura.

Para efeito de cálculo da energia produzida por golpe, utilizou-se a seguinte fórmula adaptada de PROCTOR:

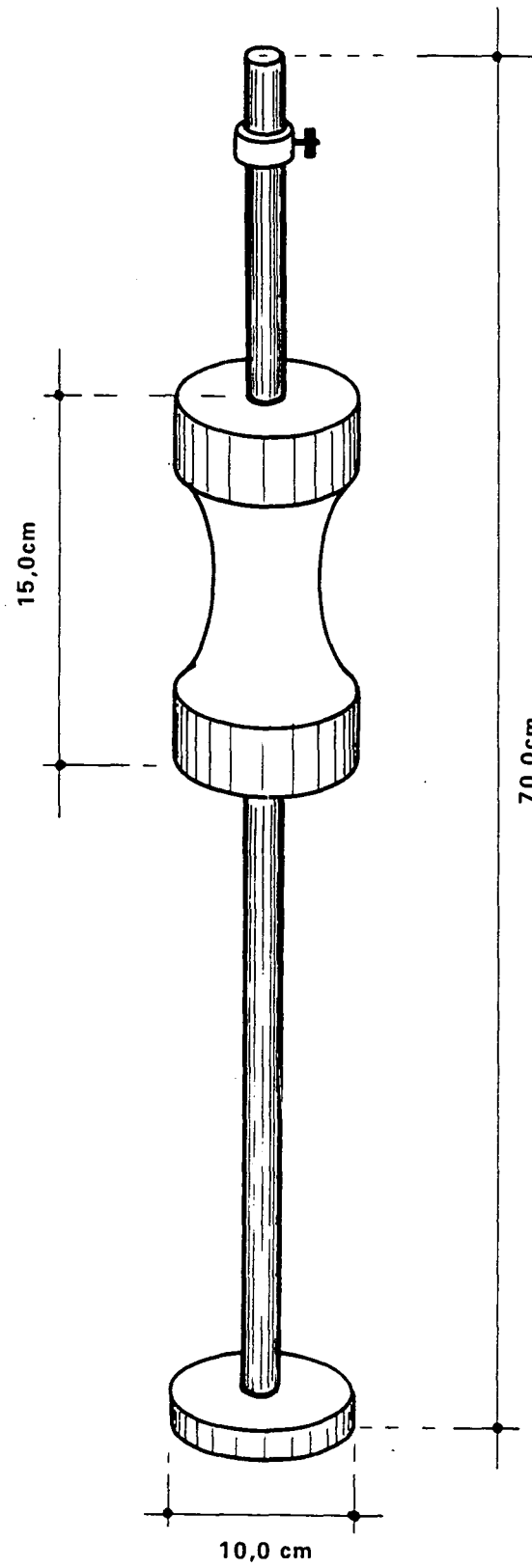


FIGURA 1 - Aparelho Compactador (PROCTOR modificado).

$$E = \frac{P \times a \times g}{S} N$$

Sendo: E = Energia Aplicada (Joule/cm²)

P = Massa do Soquete (9,03 kg)

a = Altura de Queda do Soquete (0,435 m)

S = Superfície de impacto (78,5 cm²)

N = Número de Golpes

g = Aceleração da Gravidade (9,81 m/s²)

Com esta fórmula determinou-se a energia aplicada por golpe que foi de **38,53 Joules** ou **0,49 J/cm² / golpe** (quadro 04).

QUADRO 04 - Energias Aplicadas nos Ensaios de Compactação

Energias E	Peso do Soquete (kg)	Altura da Queda (m)	N de Golpes	Energia p/ Golpe (Joules/cm ²)	Energia Total
E	9,03	0,435	5	0,490	2,45
E	9,03	0,435	10	0,490	4,90
E	9,03	0,435	15	0,490	7,35
E	9,03	0,435	20	0,490	9,80

3.2.2 - Coletor de amostras

Para garantir uma coleta que sofresse as menores

interferências possíveis do coletador, construiu-se um aparelho especialmente adaptado ao tamanho dos anéis.

Ele é composto de uma sapata guia (figura 2c), utilizada para acondicionar o anel coletor (figura 2b) no centro do local compactado. O anel é encaixado dentro do cano guia fixado na sapata, e em seguida é pressionado por um cano de diâmetro idêntico ao do anel (figura 2a), até sua introdução total no solo.

O anel coletor foi construído de cobre, com as seguintes dimensões:

.diâmetro	=	3,6 cm
.altura	=	2,5 cm
.espessura	=	0,2 cm
.volume	=	25,43cm ³

3.2.3 - Penetrômetro

Para determinação do Índice de Cone (IC) que mede a resistência à penetração, foi utilizado o penetrômetro da SOLOTEST, Ref. S-210 (ver anexo 13).

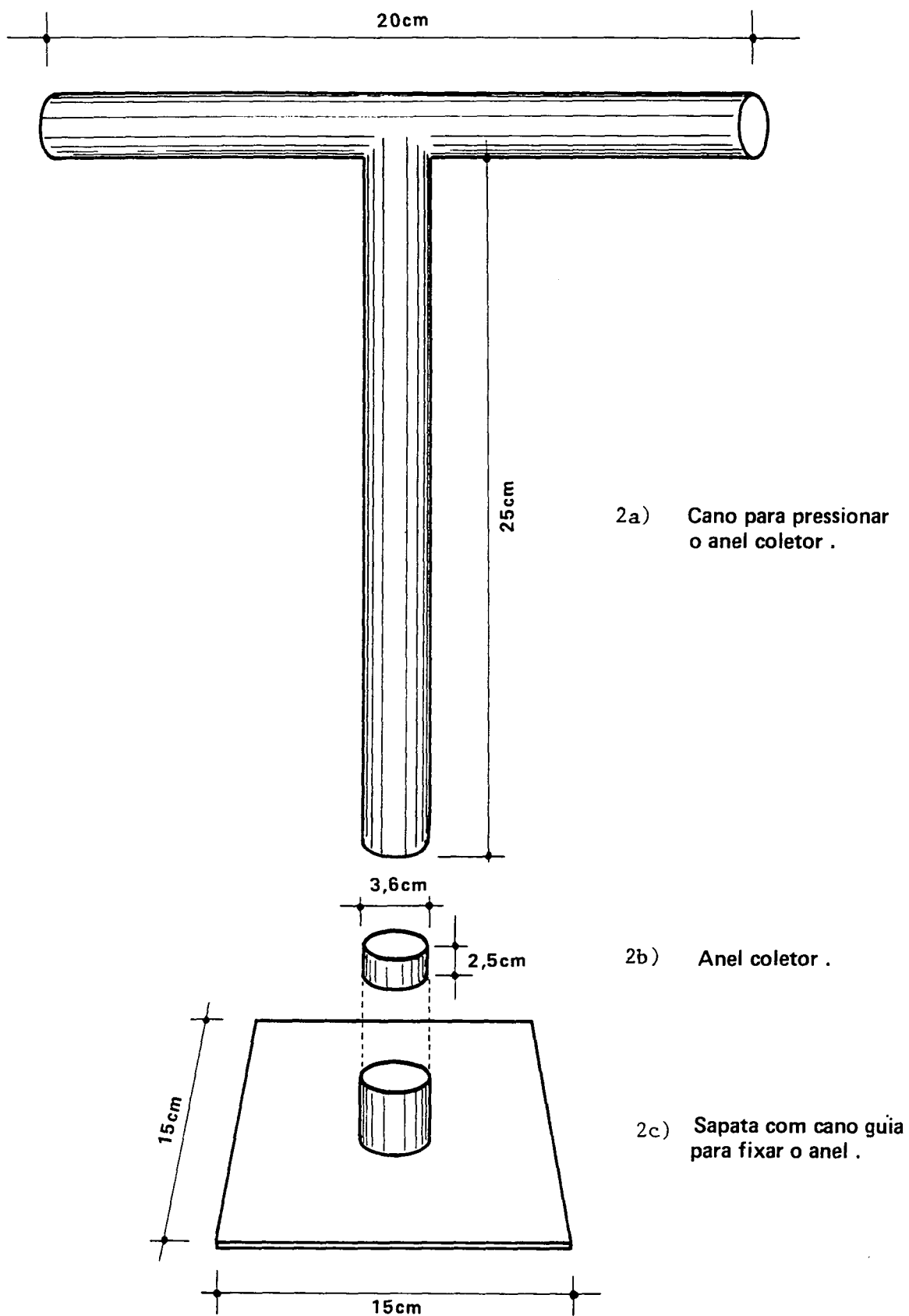


FIGURA 2 - Conjunto coletor de amostras: 2a) cano para pressionar o anel coletor; 2b) anel coletor; 2c) sapata com cano guia para fixar o anel

4 - MÉTODOS

4.1 - Delineamento Experimental

Uma área de 100 m² foi subdividida em 20 parcelas de 5 m cada. De cada parcela, por ocasião da coleta, foi retirada a camada superficial de 10 cm para eliminar a vegetação (grama) e grande parte do sistema radicular, afim de evitar interferências no processo de compactação.

4.2 - Compactação das parcelas

Após a eliminação da camada superficial, a parcela foi subdividida em 5 subparcelas (figura 3), sendo uma no centro e as outras uma em cada canto. Cada subparcela foi compactada com energias diferentes através do PROCTOR - modificado, esquematizado na figura 1.

Com este aparelho foi possível conseguir energias de compactação equivalentes a $E_1 = 2,45$; $E_2 = 4,90$; $E_3 = 7,35$ e $E_4 = 9,80$ Joules/cm². A subparcela localizada no centro não foi compactada e usada como testemunha (Energia zero - E_0).

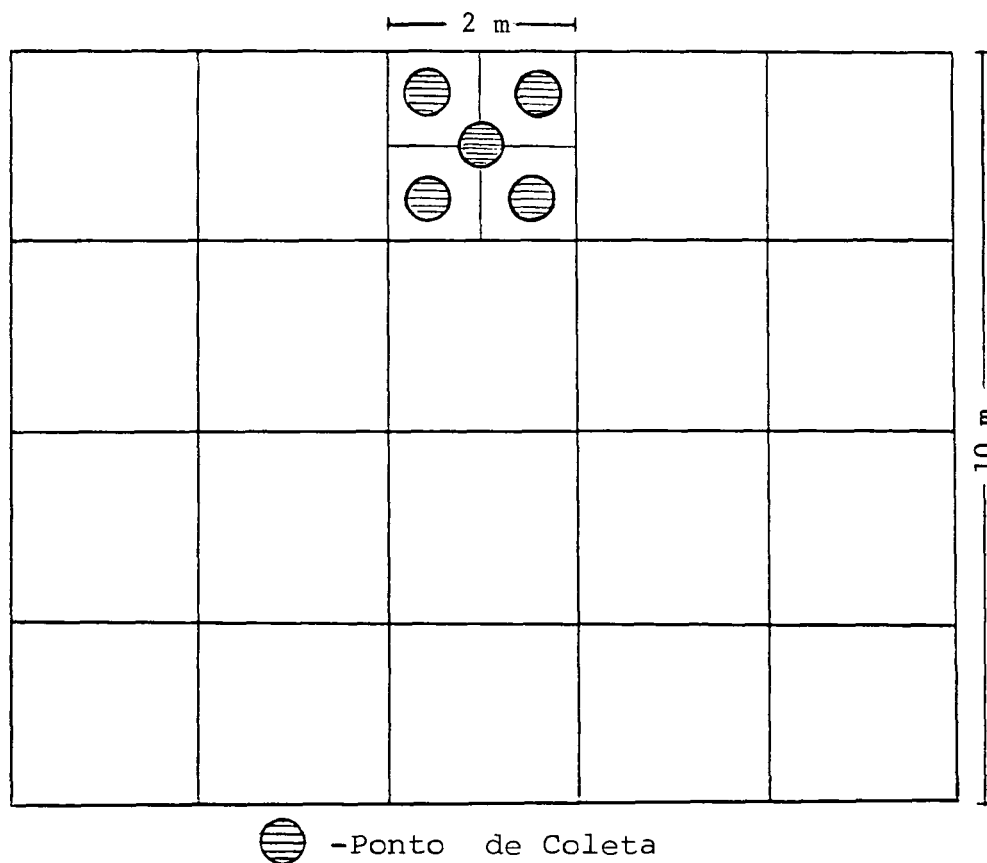


FIGURA 3 - Distribuição Espacial das Parcelas e Local de Parcelas.

4.3 - Resistência à compactação

Após a compactação e antes da coleta, foi determinada a resistência à penetração através do Penetrômetro de haste, modelo S-210 da SOLOTEST, em 60 amostras.

4.4 - Coleta das amostras

Após a compactação e a determinação do Índice de Cone, foram feitas coletas das amostras em três camadas: a primeira de 0 a 5 cm; a segunda de 5 a 10 cm e a terceira de 10 a 15 cm de profundidade. As amostras foram coletadas em anéis de metal de 25,43 cm³, cravados no solo com auxílio do aparelho coletor descrito na figura 2. Em seguida, a mostra foi vedada para transporte até o laboratório. Ao todo foram coletadas 300 amostras, isto é, 100 de cada profundidade e 60 de cada energia, ao longo do experimento.

As amostras foram coletadas ao longo de um ano para se conseguir a maior variação possível de umidade.

4.5 - Métodos Analíticos

4.5.1 - Determinação da umidade gravimétrica (U%)

Após a coleta e antes de serem submetidas a secagem em estufas a 105°C, as amostras foram pesadas para determinação do peso da amostra úmida. Após 24 horas na estufa foram pesadas novamente para determinação do peso da amostra seca. Em seguida calculou-se a umidade gravimétrica de cada amostra através dos seguintes cálculos:

$$\text{Umidade Gravimétrica (U\%)} = \frac{\text{Massa Solo Úmido} - \text{Massa Solo Seco}}{\text{Massa Solo Seco}} = \frac{\text{Massa da Água}}{\text{Massa Solo Seco}}$$

4.5.2 - Densidade global (Ds)

Relação entre a massa do solo seco em estufa a 105°C e o volume total do anel coletor (25,43 cm³).

4.5.3 - Densidade de partículas (Dp)

Determinada em T.F.S.E. (105°C) pelo método do balão de volume conhecido e álcool etílico - média de 10 repetições. Obteve-se o valor de 2,60 gr/cm³ (média de 10 repetições).

4.5.4 - Porcentagem total de poros calculados (VTPc) ou Porosidade Total

Obtido pela relação:
$$VTPc = \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) 100$$

4.5.5 - Macroporosidade (MACR)

Determinada pela diferença entre o VTPc e a microporosidade.

4.5.6 - Microporosidade

Considera a porcentagem de microporos igual a porcentagem de água retida no solo quando submetido a uma sucção de 0,06 Atm., determinado em placas de cerâmica em câmara de pressão.

4.5.7 - Retenção de água

Determinada em placas de cerâmica, em câmara de pressão à tensões de 0,06; 0,33; 1 e 3 Atm., com amostras não deformadas e a 15 Atm., com amostras deformadas.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Efeito da Compactação nas Propriedades Físicas do Solo

Os dados apresentados no Quadro 05, obtidos com umidades a campo (que variou entre 38 a 40% no período do experimento), mostram que a aplicação das quatro diferentes energias refletiram-se diretamente na densidade global do solo e conseqüentemente na sua porosidade, nos três níveis de profundidade observadas.

Ao se analisar o Quadro 06, observa-se que o ponto de umidade ótima de compactação (U₀), onde se obteve as massas específicas máximas, encontra-se predominantemente entre os valores de 34 a 36% (g H₂O/100 g de solo), demonstrando que existem duas relações lineares distintas e inversas entre a densidade global do solo e a umidade gravimétrica, sendo que o ponto de umidade ótima para compactação define a intersecção das retas (PI) do ramo úmido e do ramo molhado.

A cada energia aplicada correspondeu um aumento da densidade global quando comparado com a testemunha, confirmando o comportamento dinâmico do solo quando submetido a uma carga, corroborando com BAVER & GARDNER (1973); FAURE (1978), VIANA (1988). Foi possível constatar ainda o efeito

QUADRO 05 - Variação da retenção de umidade, densidade global e porosidade do solo, submetido a diferentes energias de compactação

Energia aplicada J/cm ²	Profundidade cm	Densidade global g/cm ³	Umidade de campo		Umidade de saturação		0,06 atm		0,33 atm		1,0 atm		3,0 atm		Macro	Micro	Total
			U%	o	U%	o	U%	o	U%	o	U%	o	U%	o			
E ₀ Testemunha 0,0	10 a 15	1,090	39,3	41,8	53,0	57,4	44,3	48,1	40,7	44,4	39,0	42,5	38,0	41,4	10,11	48,1	58,2
	15 a 20	1,091	38,5	41,9	53,1	57,6	45,0	48,9	39,8	43,3	36,8	40,1	34,9	38,1	9,3	48,9	58,2
	20 a 25	1,090	39,1	42,6	54,9	59,7	46,3	50,3	40,9	44,6	37,7	42,0	35,7	38,9	7,9	50,3	58,2
E ₁ 2,45	10 a 15	1,162	39,5	45,9	48,8	56,7	44,1	51,2	40,8	47,4	39,3	45,7	37,3	43,3	4,3	51,2	55,5
	15 a 20	1,112	39,1	45,5	50,5	56,1	45,1	50,1	40,8	46,1	38,8	43,1	37,3	41,5	7,3	50,1	57,4
	20 a 25	1,091	38,8	45,1	53,0	57,8	45,9	50,1	41,1	44,8	39,2	42,8	37,2	40,6	8,1	50,1	58,2
E ₂ 4,90	10 a 15	1,164	40,2	46,8	50,9	58,2	45,2	52,6	40,6	47,2	39,0	45,4	37,7	43,8	2,8	52,6	55,4
	15 a 20	1,142	39,5	45,1	50,3	57,4	45,7	52,2	41,6	47,5	39,8	45,4	37,8	43,2	4,2	52,2	56,4
	20 a 25	1,105	39,8	44,0	52,5	58,0	46,8	51,7	41,7	46,1	40,1	44,2	37,7	41,2	4,5	51,7	56,2
E ₃ 7,35	10 a 15	1,181	38,8	45,8	48,7	57,5	44,6	52,7	40,5	47,8	38,7	45,7	37,0	43,7	2,0	52,7	54,7
	15 a 20	1,148	40,0	45,9	49,8	57,2	46,0	52,8	41,1	47,2	38,8	44,5	37,6	43,2	3,2	52,8	56,0
	20 a 25	1,118	40,3	45,0	52,3	58,5	46,5	52,0	41,6	46,5	39,6	44,2	37,2	41,6	5,2	52,0	57,2
E ₄ 9,80	10 a 15	1,189	39,3	46,7	49,2	58,5	45,3	53,9	41,3	49,1	39,5	47,0	38,1	45,3	0,5	53,9	54,4
	15 a 20	1,175	39,6	46,5	49,2	57,8	45,7	53,6	41,1	48,4	39,3	46,1	37,4	43,9	1,5	53,6	55,1
	20 a 25	1,110	40,2	44,6	55,0	61,0	47,6	52,8	41,6	46,2	39,6	43,9	36,5	40,5	4,6	52,8	57,4

- U% = Umidade Gravimétrica (g H₂O/100 g de solo)
 - o = Umidade Volumétrica (cm H₂O/100 cm de solo)
 - Umidade a 15 atm U = 24,7%

QUADRO 06 - Pontos de Intersecção (PI) e Pontos da Umidade Ótima Para Compactação (UO) em Cada Energia

Profundidade	ENERGIAS									
	E ₀ Testemunha		E ₁ (2,45 J/cm ²)		E ₂ (4,90 J/cm ²)		E ₃ (7,35 J/cm ²)		E ₄ (9,80 J/cm ²)	
	PI	UO%	PI	UO%	PI	UO%	PI	UO%	PI	UO%
1 (10 a 15 cm)	1,182	34,90	1,213	35,63	1,211	34,38	1,251	37,29	1,269	35,70
2 (15 a 20 cm)	1,129	34,83	1,121	35,46	1,148	34,14	1,158	39,81	1,216	34,88
3 (20 a 25 cm)	1,114	34,34	1,098	35,46	1,122	34,67	1,152	37,50	1,180	33,71
X (média)	1,142	34,70	1,145	35,25	1,161	34,43	1,189	37,80	1,221	34,85

-PI = Ponto de Intersecção dos ramos úmido e molhado da curva de compactação (onde a densidade global é máxima).

-UO = Ponto de umidade ótima para compactação (onde ocorre a máxima compactação).

da energia aplicada nas camadas subsequentes (figura 4), onde os efeitos maiores foram percebidos na primeira camada (10 a 15 cm) em todas as energias e os menores na terceira camada (20 a 25 cm). Houve aumento da densidade em todas as amostras, atingindo o valor mais alto quando se aplicou a energia 4 ($9,80 \text{ J/cm}^2$), embora já na energia 1 ($2,45 \text{ J/cm}^2$) fosse possível obter na primeira camada valores de densidade global, bem acima das testemunhas, como demonstram os resultados do quadro 06.

Da mesma forma que a aplicação de energia alterou a densidade do solo, a porosidade total também foi afetada. Na Figura 5, observa-se que enquanto a testemunha (E_0) apresentou na primeira camada 10,1% de macroporos e 48,1% de microporos, a medida que foram sendo aplicadas as energias a macroporosidade foi diminuindo, chegando a 0,5% na energia 4, enquanto que a microporosidade aumentou para 53,9% e a porosidade total, que na testemunha era de 58,2% baixou para 54,4%. Isto demonstra que as energias aplicadas no experimento foram adequadas para o estabelecimento de parâmetros e estudos de compactação do solo a nível de campo, chegando-se muito próximo a eliminação total dos macroporos com aplicação da energia 4 ($9,80 \text{ J/cm}^2$).

Também pode ser observado no quadro 5 que a medida que o solo foi submetido a maiores energias, maior foi a retenção de água em relação ao seu volume, como era de se esperar, pelo aumento da microporosidade em relação a porosidade total da testemunha.

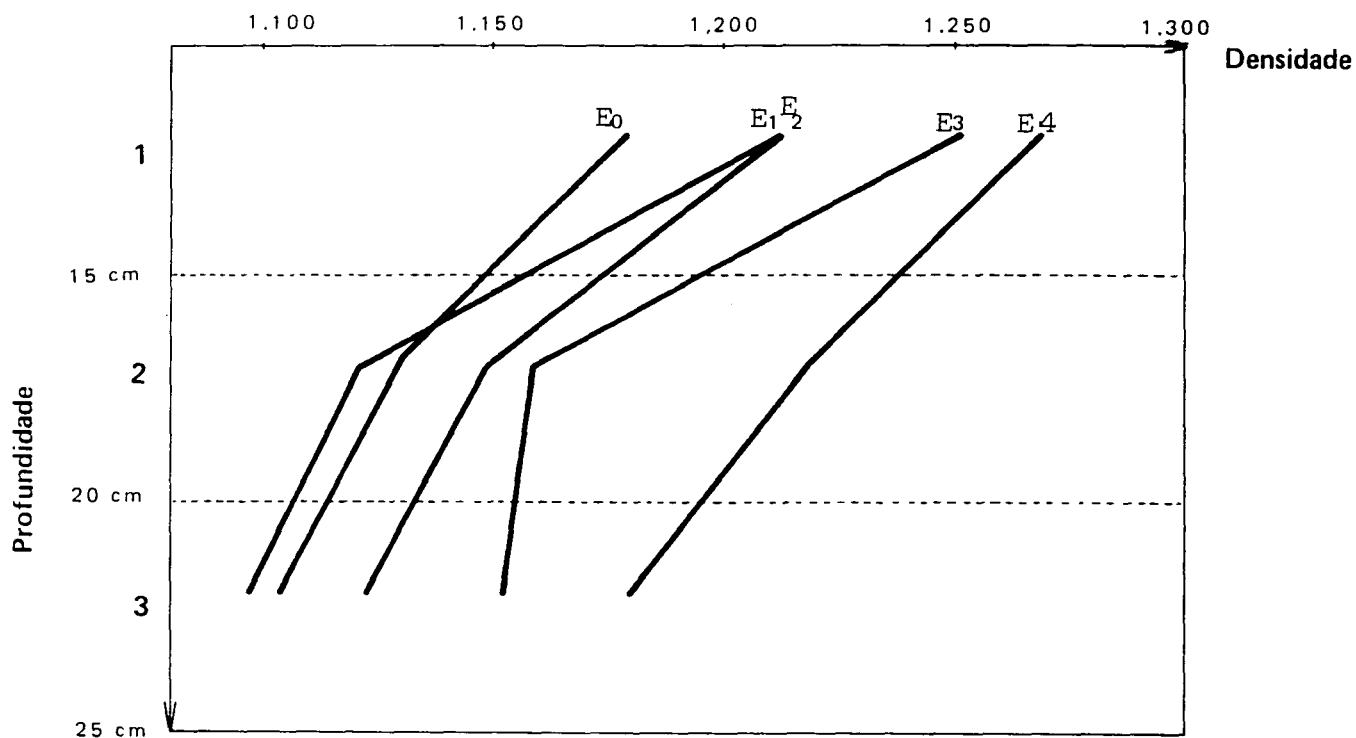


FIGURA 4 - Efeito em profundidade na densidade global do solo em função da aplicação de diferentes energias.

5.2 - Variação da densidade global do solo em função da umidade e da energia aplicada

As curvas de compactação do solo estudado (figuras 6 a 28), foram obtidas com base nas equações de regressão, que por sua vez estão fundamentadas nos resultados experimentais obtidos no campo. Os referidos dados encontram-se nas Tabelas 01 a 05 dos Anexos.

Cada gráfico apresenta pontos característicos, o que convencionamos chamar "Ponto de Interseção" (PI) e "Ponto de Umidade Ótima para Compactação" (UO). Os

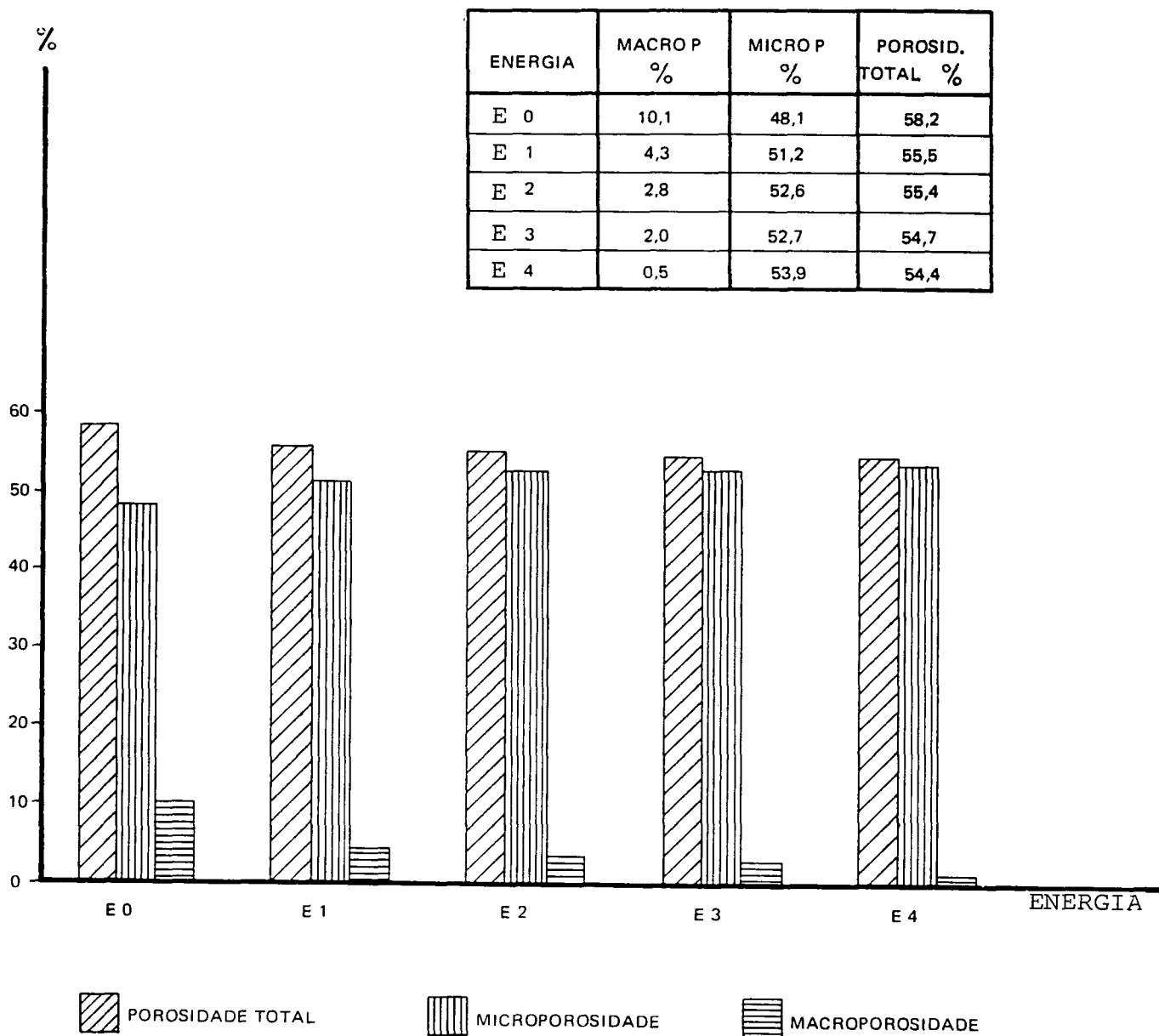


FIGURA 5 - Variação da porosidade em função da energia no solo com 39% de umidade (1ª camada).

referidos pontos estão destacados nas Tabelas de 06 a 10 dos Anexos, obtidos no ponto de interseção das regressões do ramo úmido e molhado.

O "ramo úmido" é o segmento ascendente da curva de compactação. Neste ramo a densidade global do solo, independentemente de ter sido ou não submetido a uma energia mecânica, apresentou valores crescentes em função do aumento da umidade, até atingir seu valor máximo. A partir daí, também independentemente da intensidade da energia aplicada, a medida que aumentou a umidade, diminuíram os valores de densidade global, formando o ramo descendente da curva, o qual convencionou-se chamar de "ramo molhado".

A umidade ótima para compactação (UO), esteve sempre na faixa dos 34 a 36% de umidade gravimétrica. A variação da umidade, tanto para cima como para baixo destas faixas, proporcionou uma diminuição dos valores de densidade de massa, em todas as situações analisadas, concordando com as afirmações de BAYER & GARDNER (1973), FAURE (1978), SILVA (1986) e VIANA (1988).

Cada gráfico apresenta ainda a curva de saturação (CS) correspondente, como parâmetro comparativo à curva de compactação. É importante ressaltar que como não é possível expulsar todo o ar existente nos vazios do solo, a curva de compactação não poderá alcançar nunca a curva de saturação que é, teoricamente, a curva onde o solo não apresenta mais ar, justificando-se assim, a curva descendente ao "ramo molhado" a partir da "UO".

Visando demonstrar o efeito dissipador, produzido no solo, pelas energias aplicadas, os gráficos foram

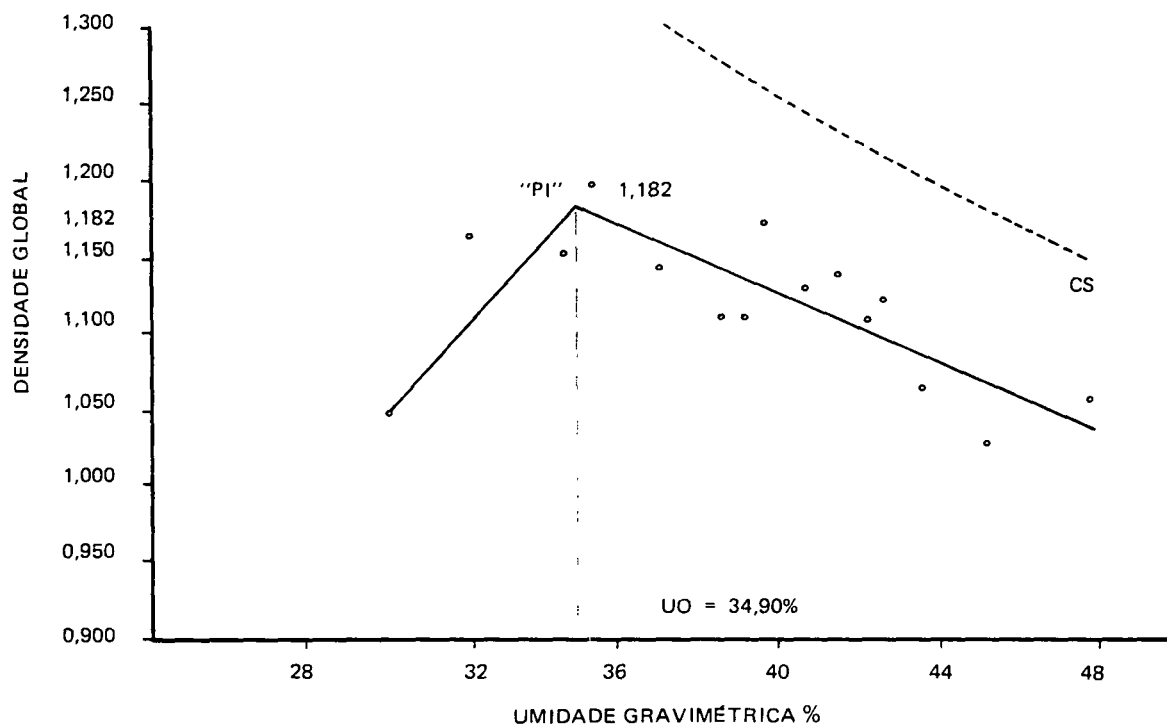


FIGURA 6 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 1 (Energia 0)

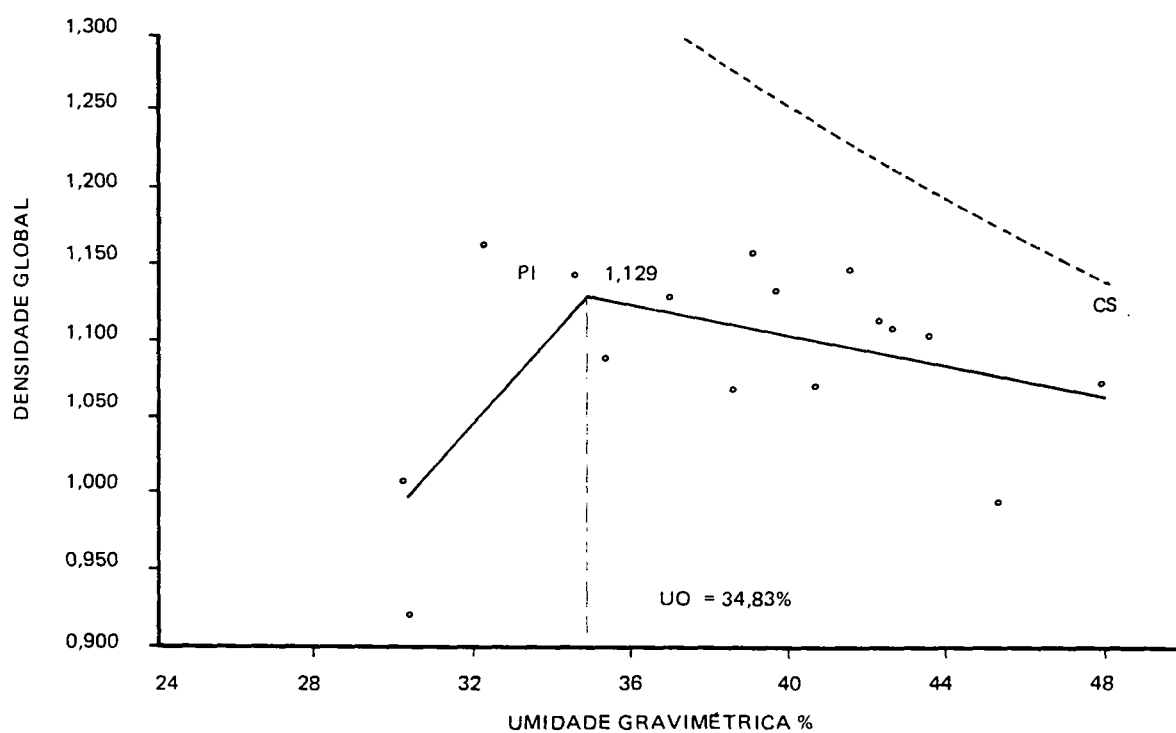


FIGURA 7 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 2 (Energia 0)

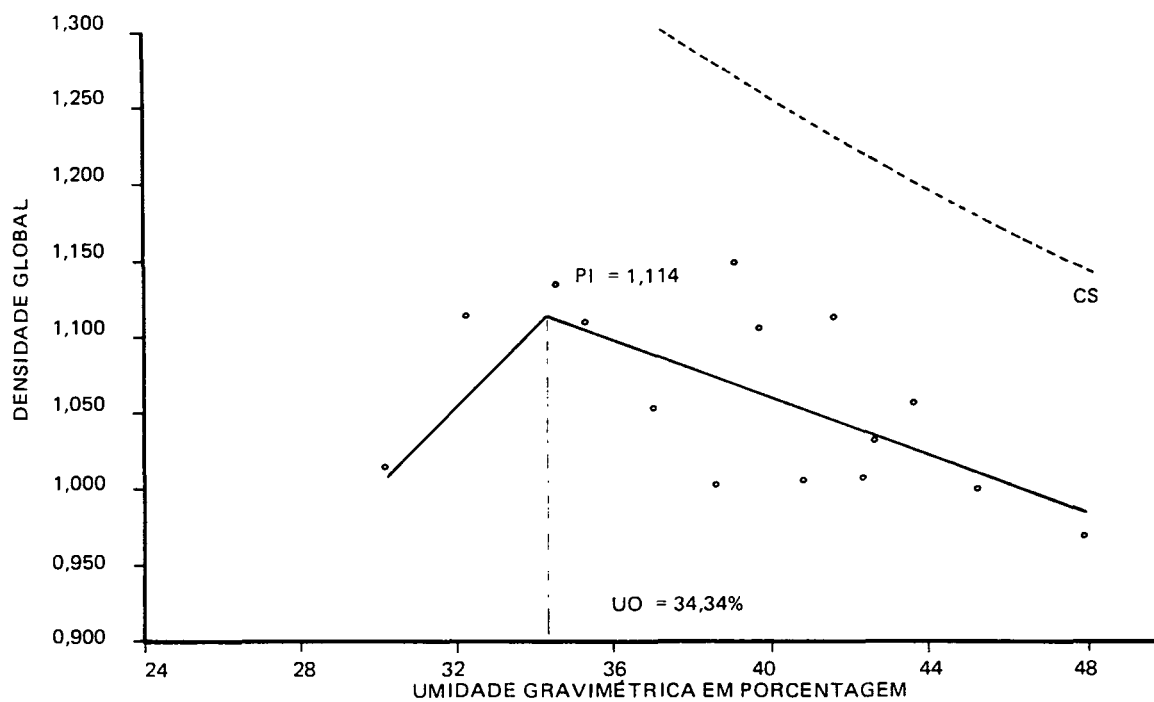


FIGURA 8 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 3 (Energia 0)

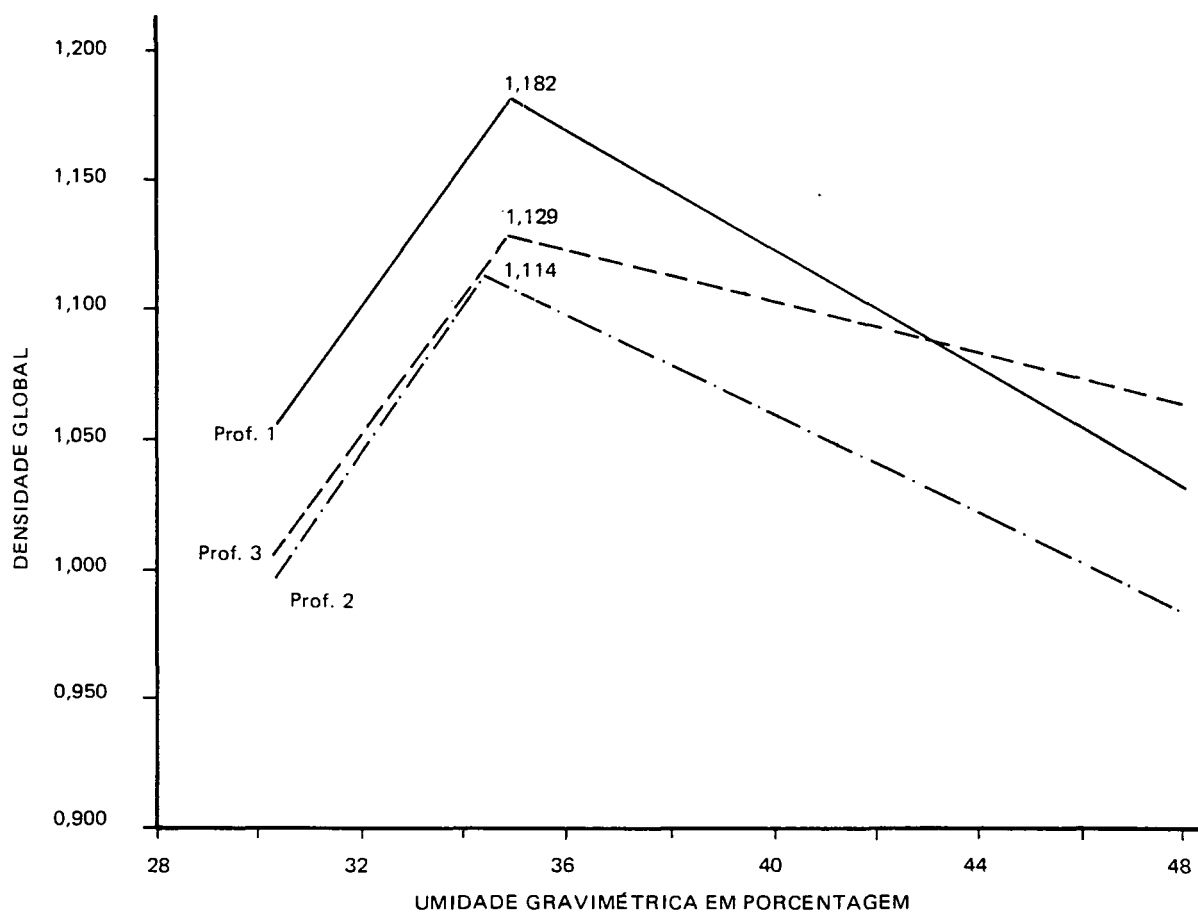


FIGURA 9 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL DO SOLO EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E UMIDADES NAS TRÊS PROFUNDIDADES (Energia 0)

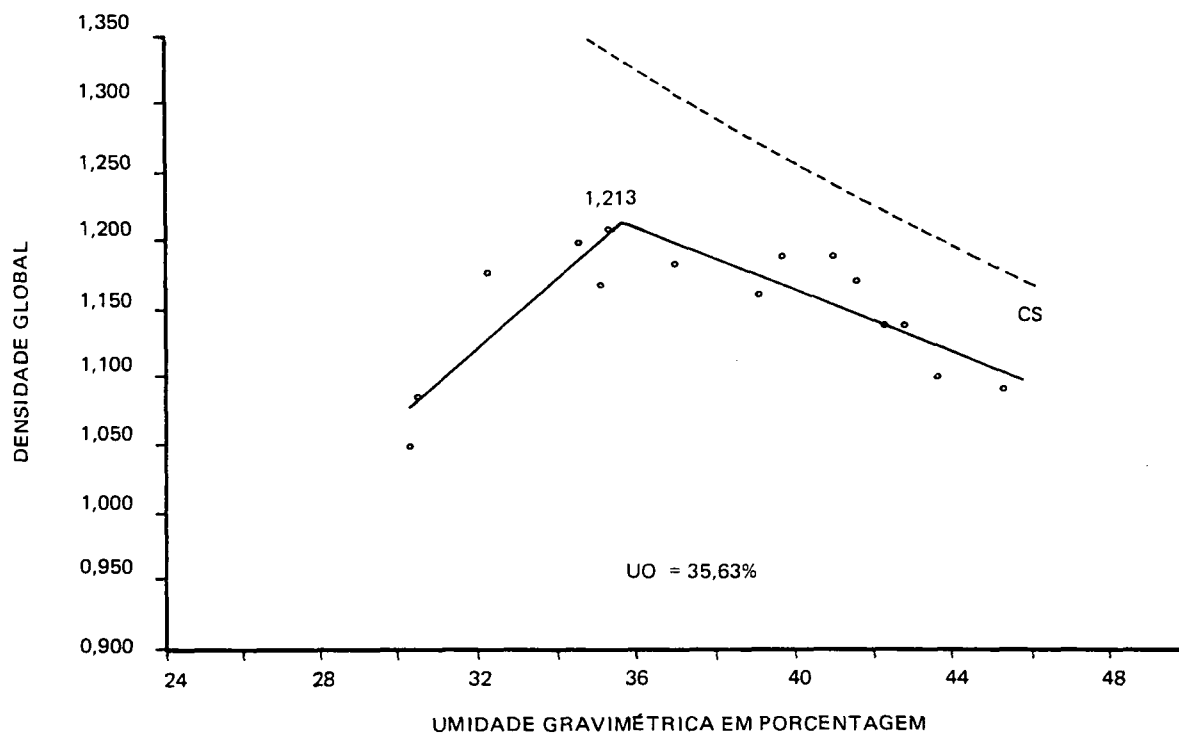
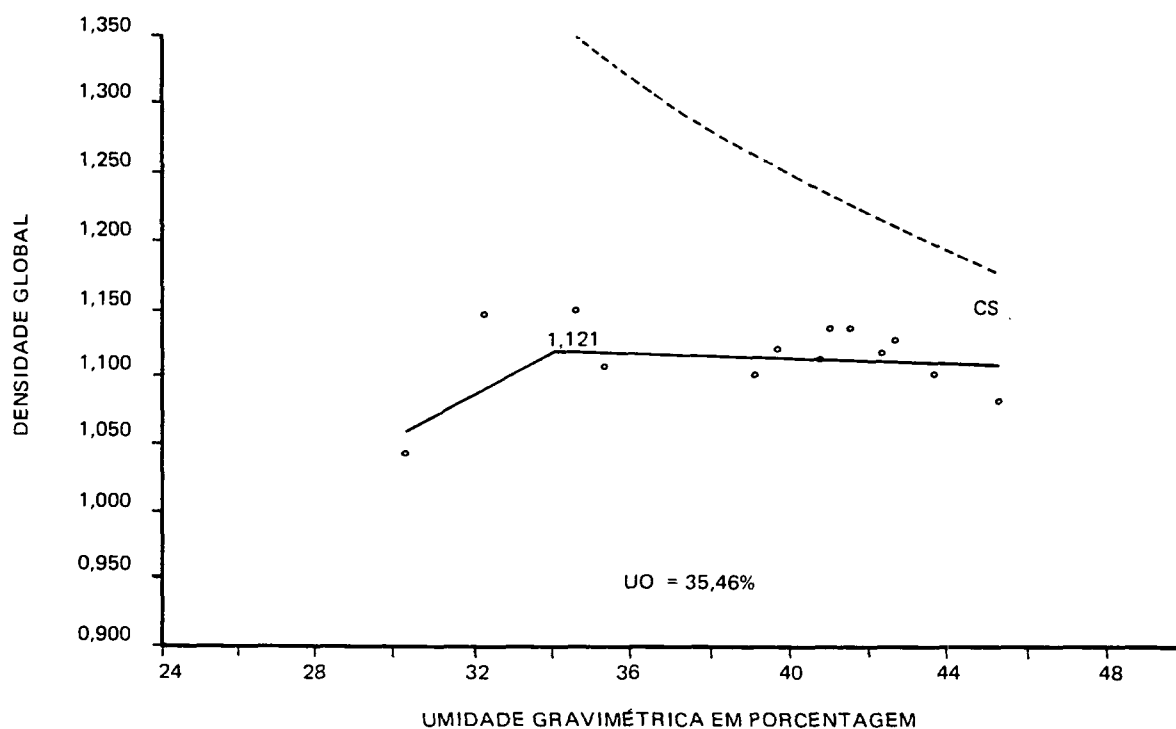


FIGURA 10 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 1 (Energia 1)



F
FIGURA 11 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 2 (Energia 1)

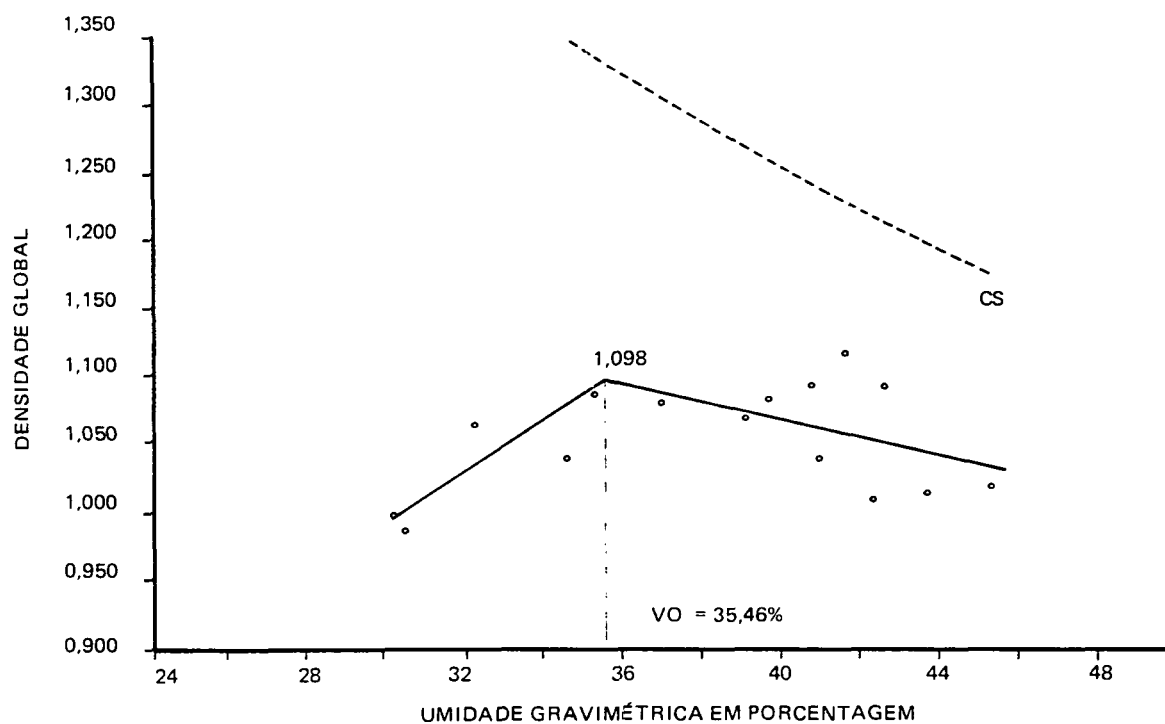


FIGURA 12 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 3 (Energia 1)

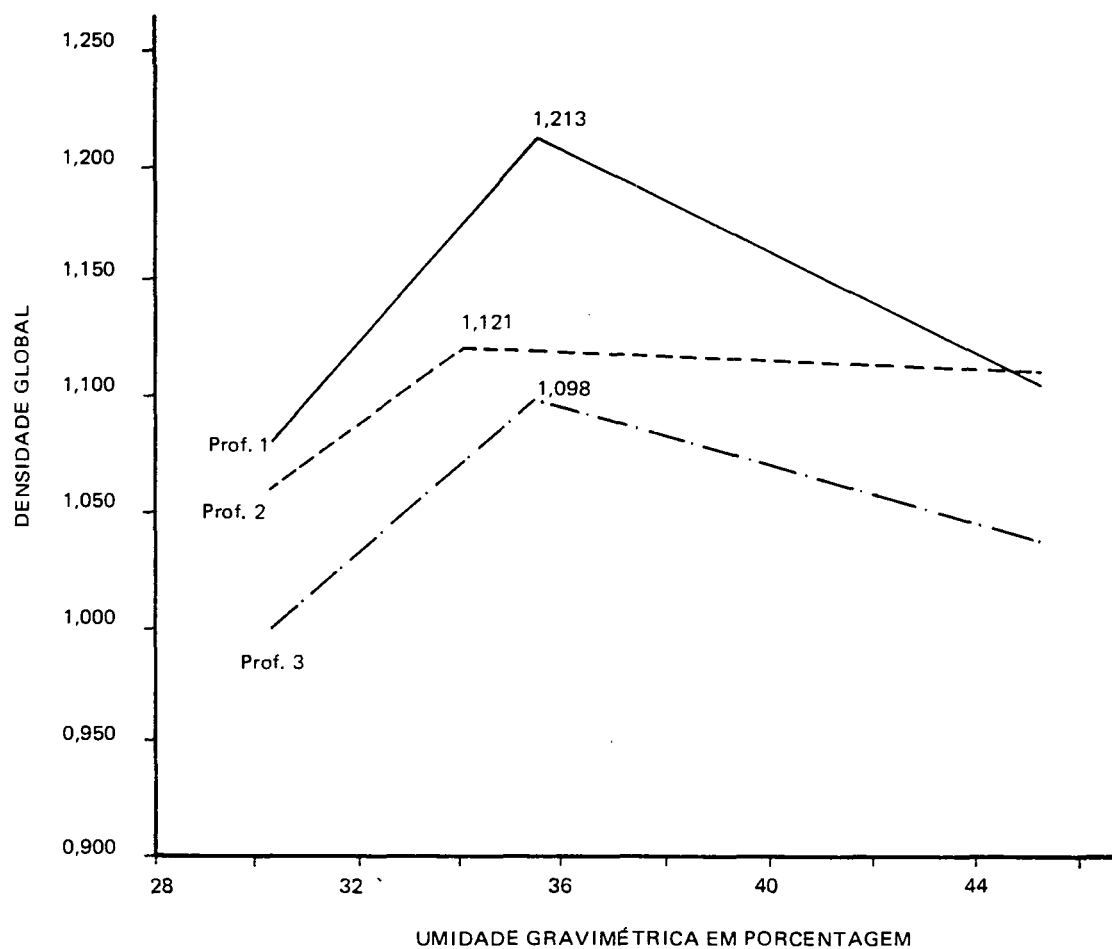


FIGURA 13 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL DO SOLO EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E UMIDADES NAS TRÊS PROFUNDIDADES (Energia 1)

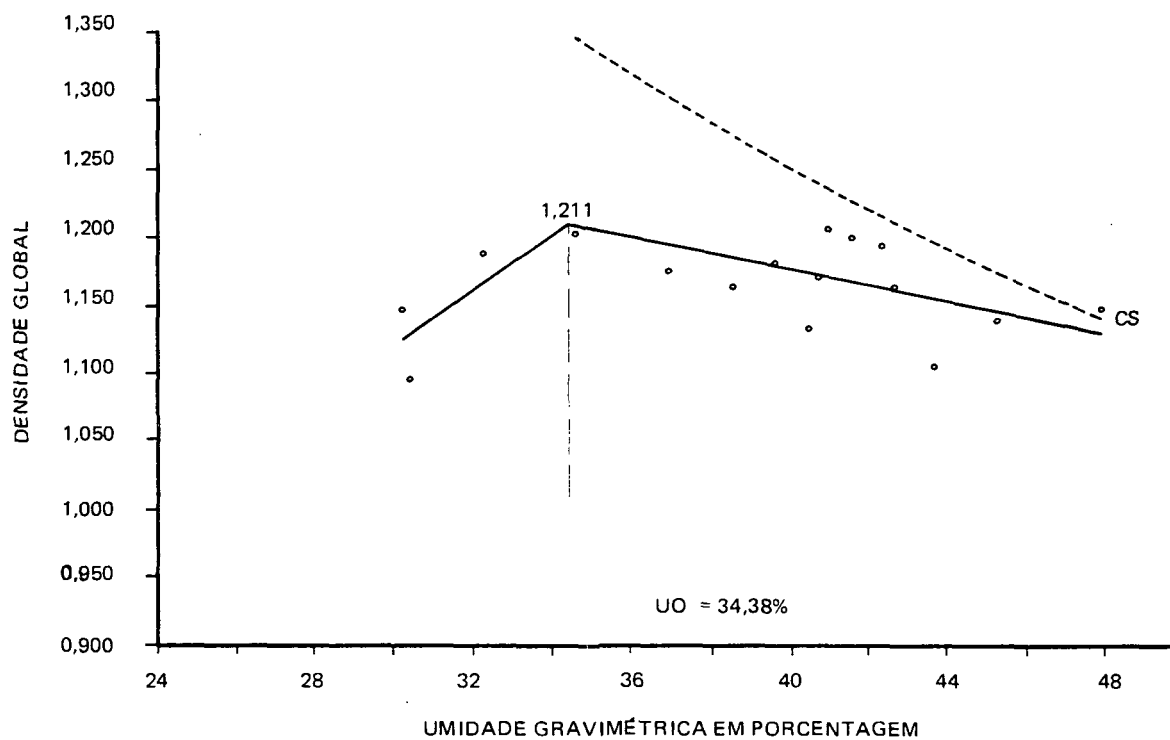


FIGURA 14 – VARIACÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 1 (Energia 2)

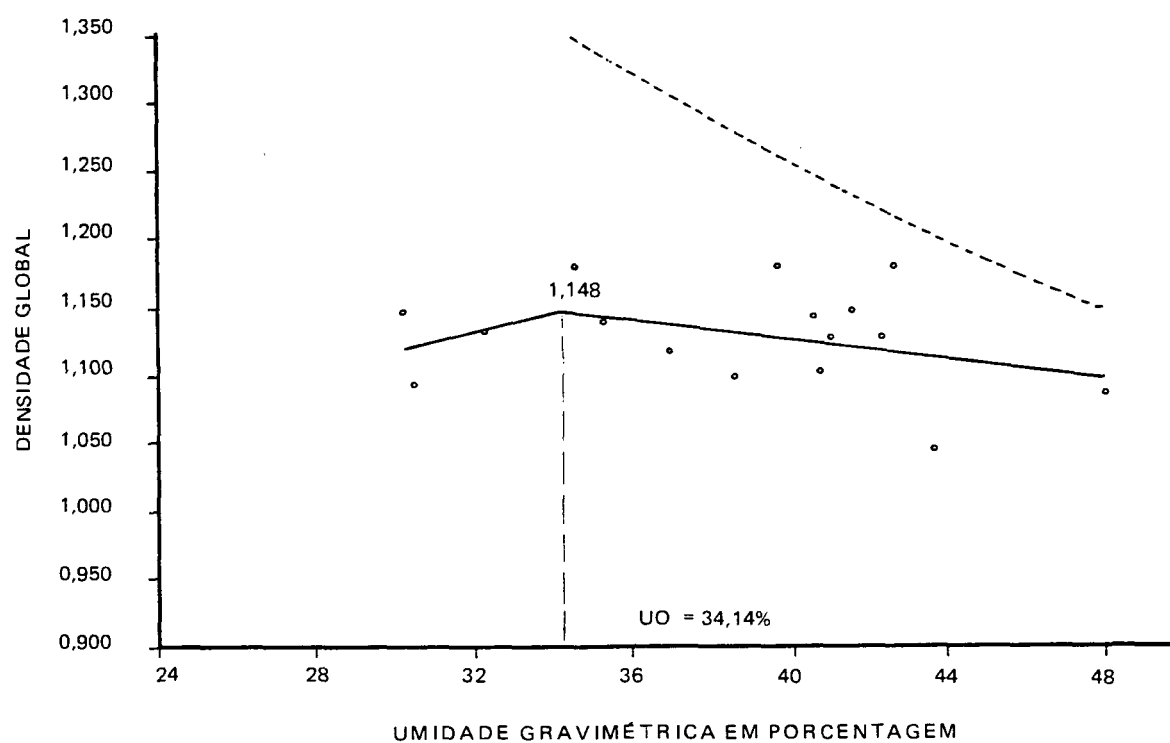


FIGURA 15 – VARIACÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 2 (Energia 2)

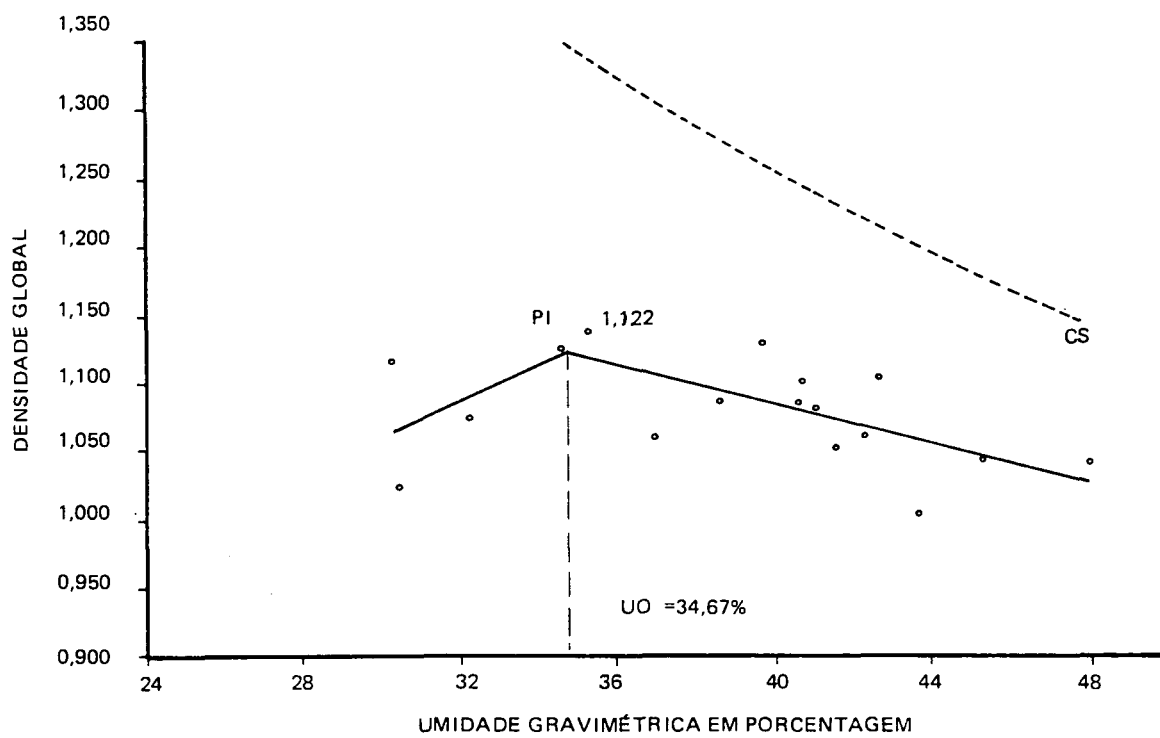


FIGURA 16 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 3 (Energia 2)

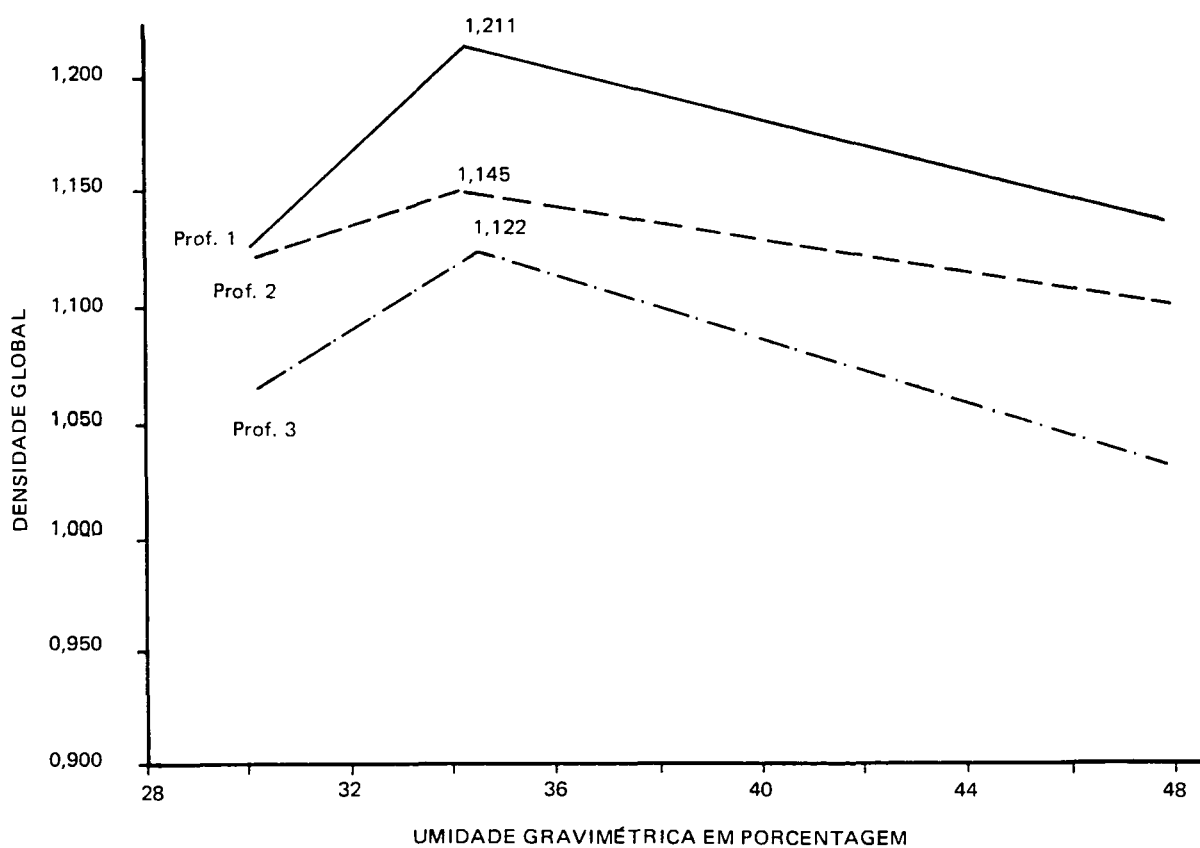


FIGURA 17 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL DO SOLO EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E UMIDADES NAS TRÊS PROFUNDIDADES (Energia 2)

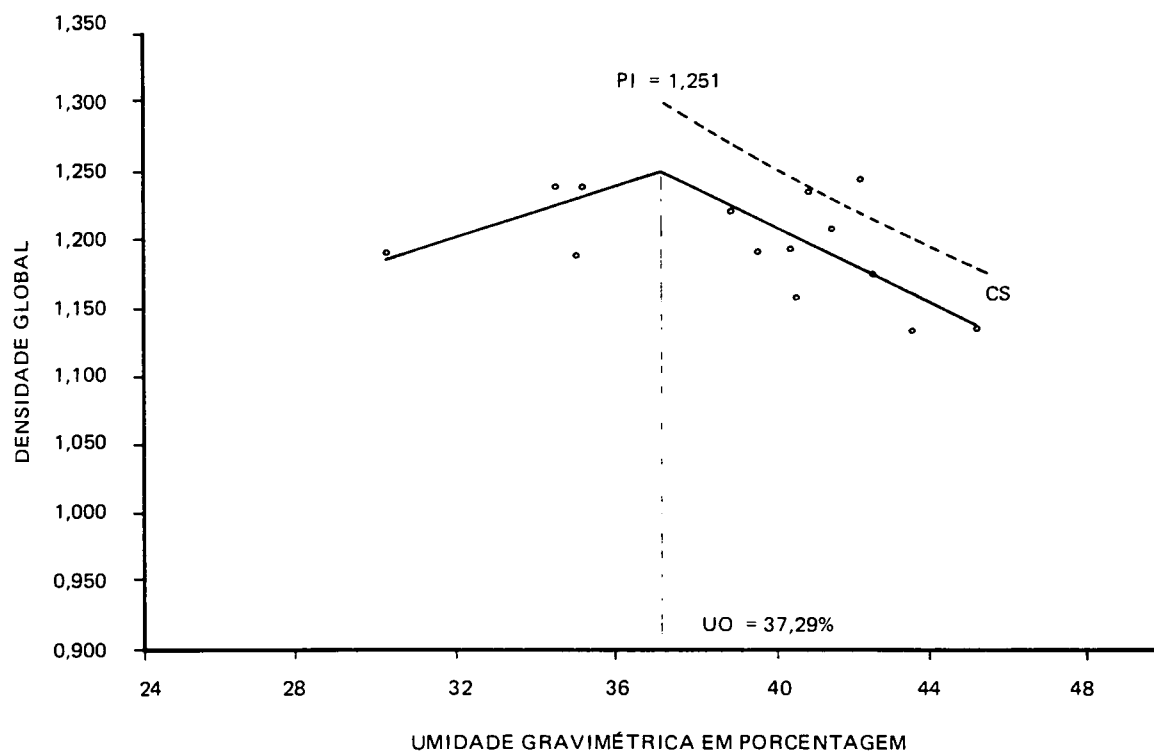


FIGURA 18 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 1 (Energia 3)

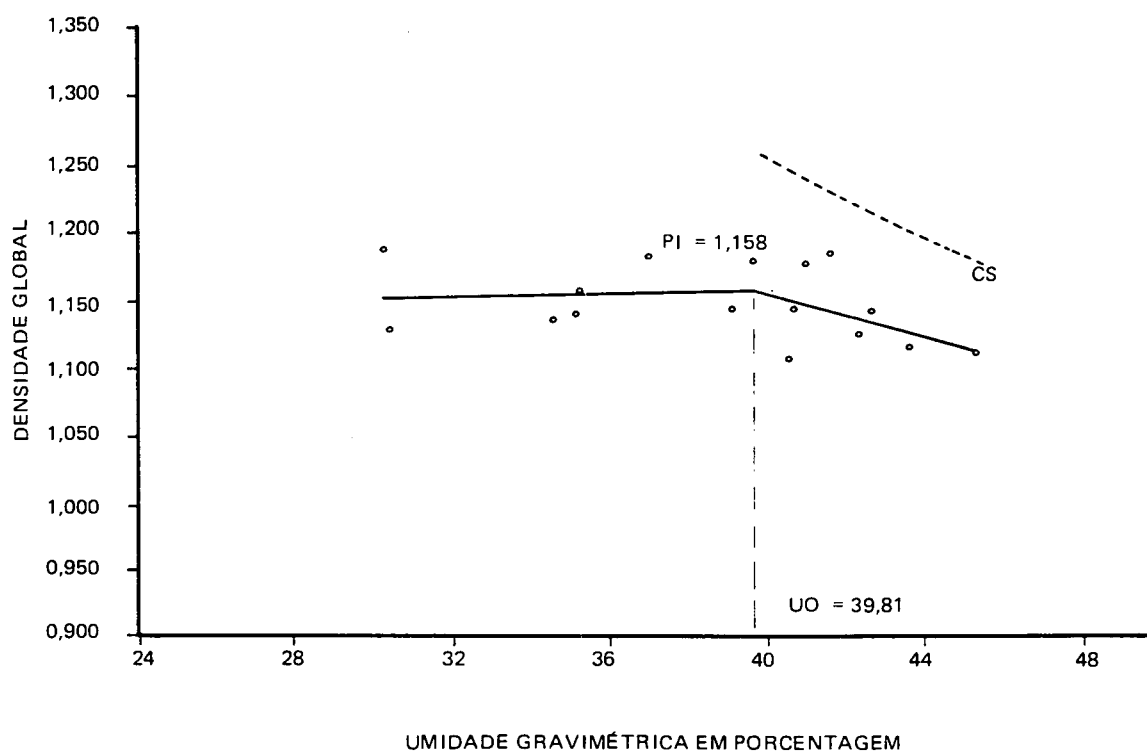


FIGURA 19 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 2 (Energia 3)

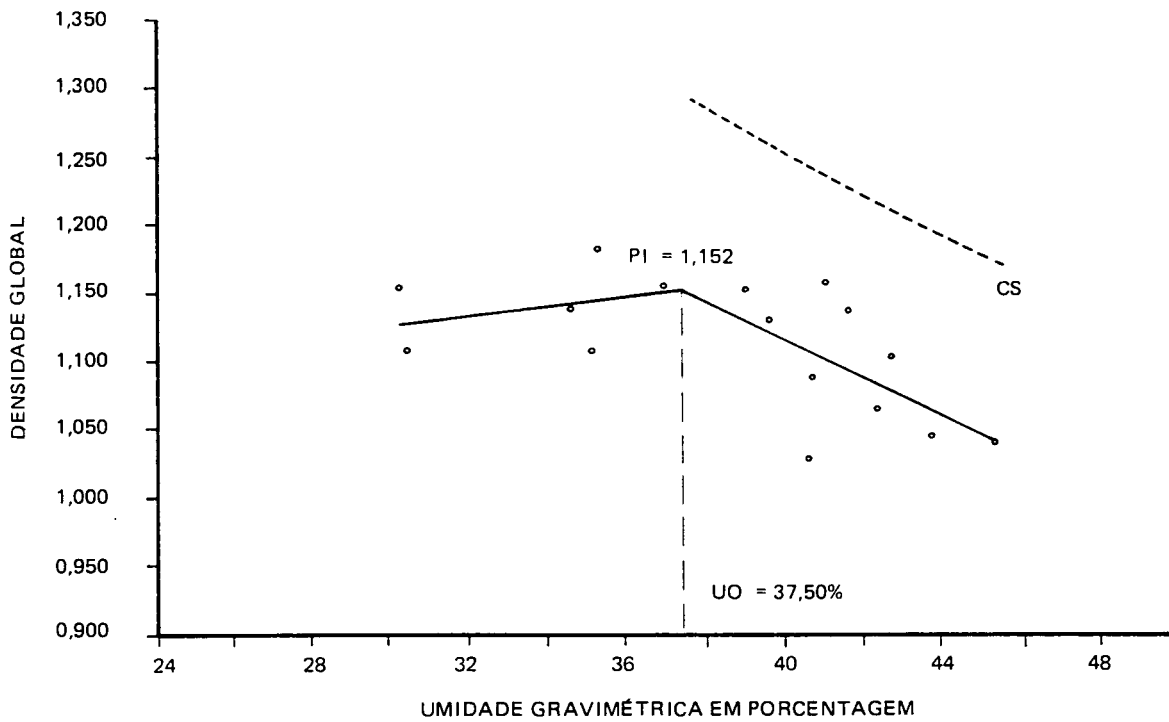


FIGURA 20 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 3 (Energia 3)

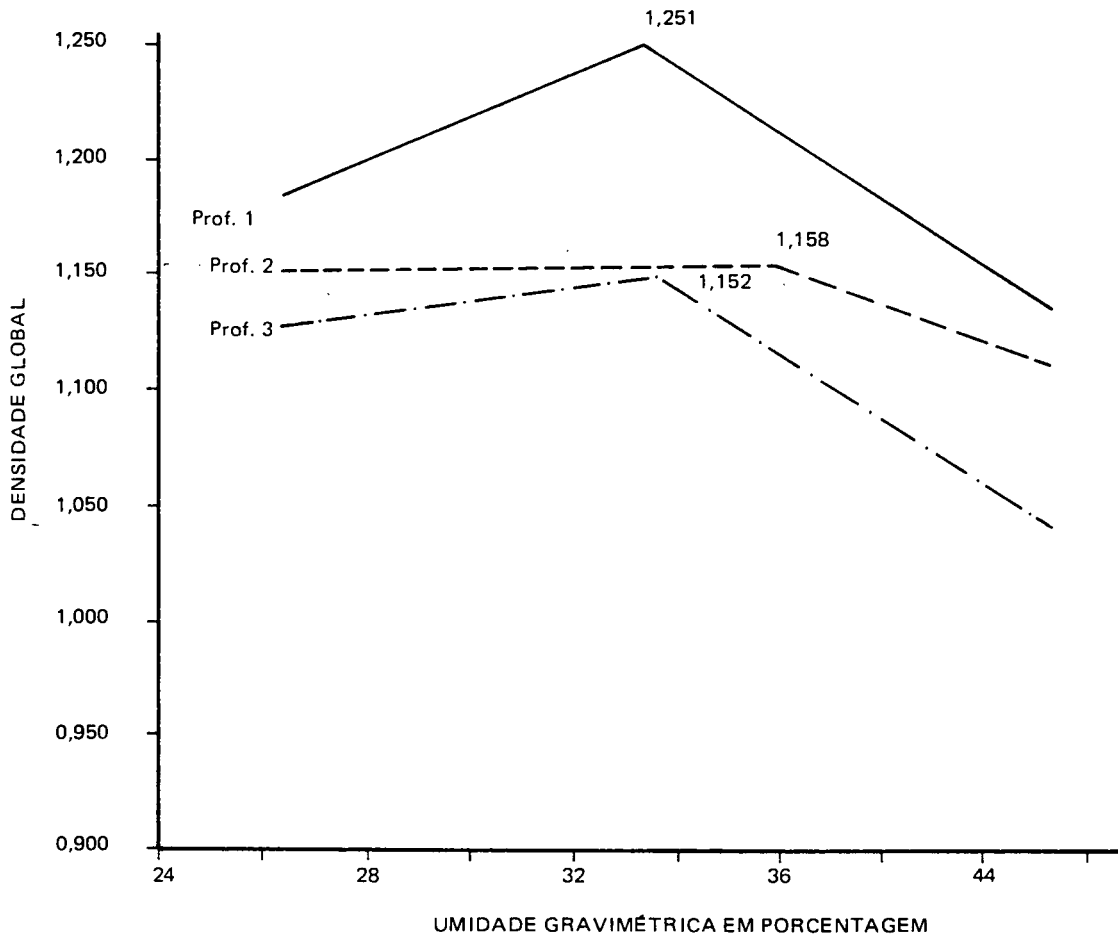


FIGURA 21 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL DO SOLO EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E UMIDADES NAS TRÊS PROFUNDIDADES (Energia 3)

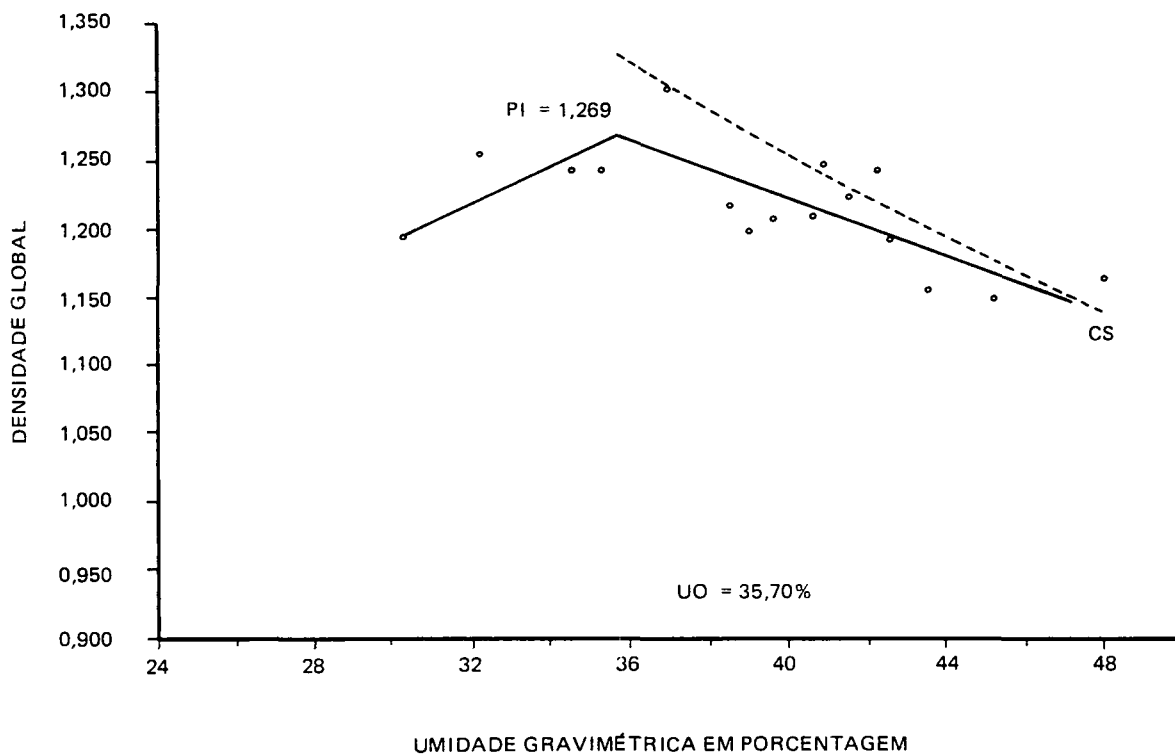


FIGURA 22 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 1 (Energia 4)

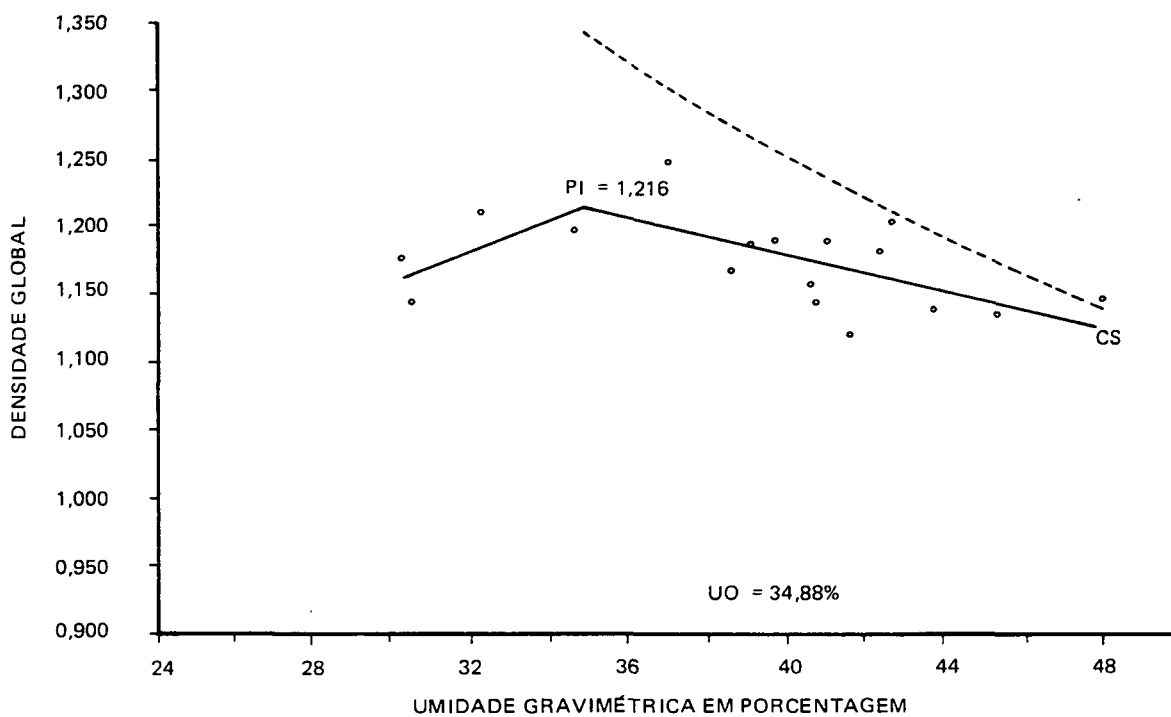


FIGURA 23 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E UMIDADE NA PROFUNDIDADE 2 (Energia 4)

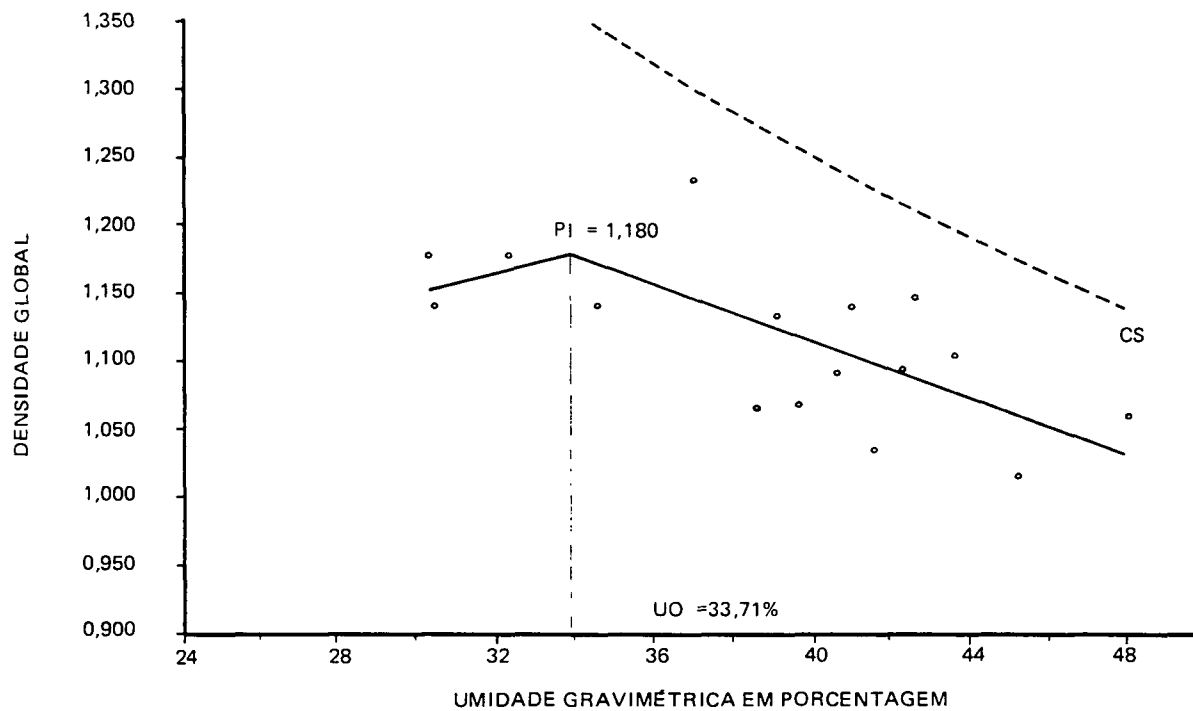


FIGURA 24 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE NA PROFUNDIDADE 3 (Energia 4)

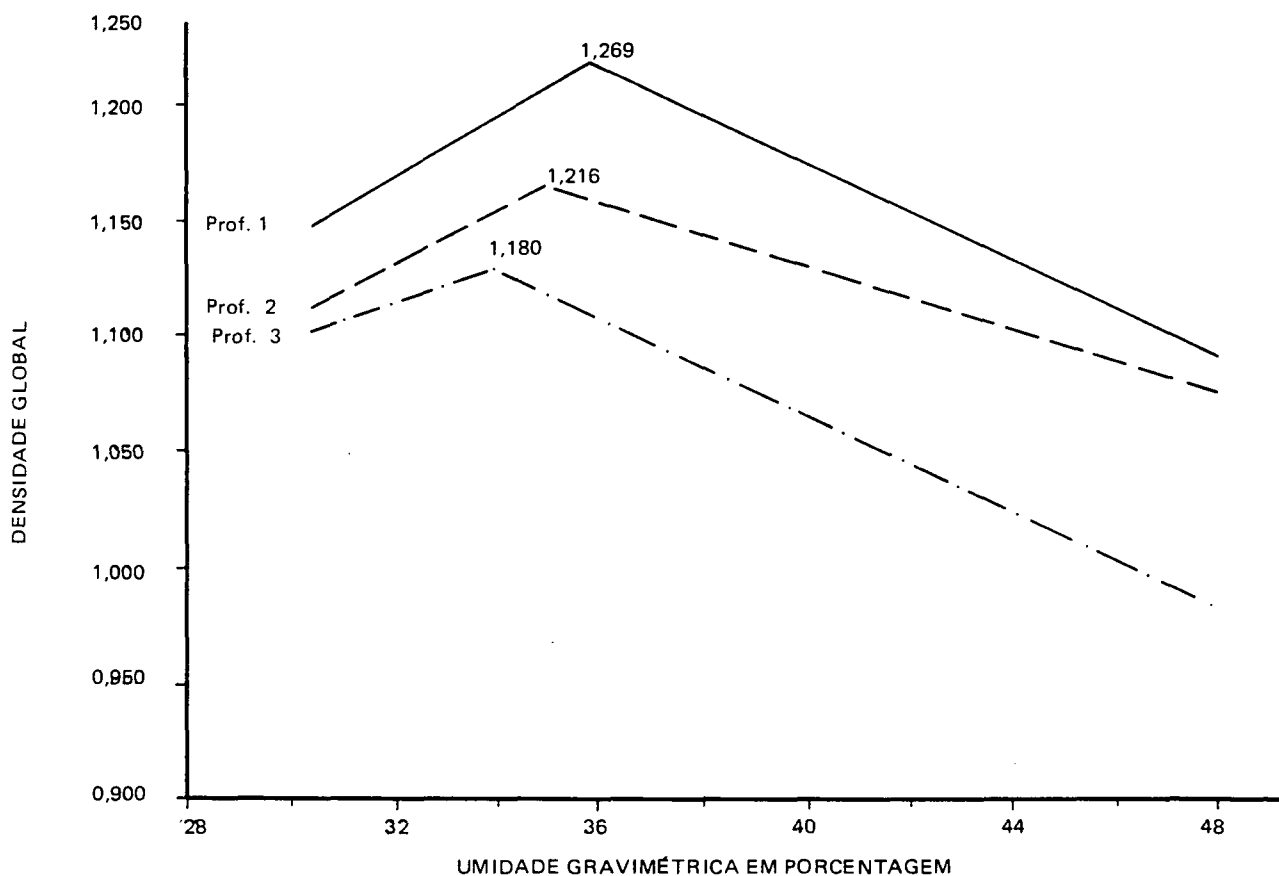


FIGURA 25 – VARIÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL DO SOLO EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E UMIDADES NAS TRÊS PROFUNDIDADES (Energia 4)

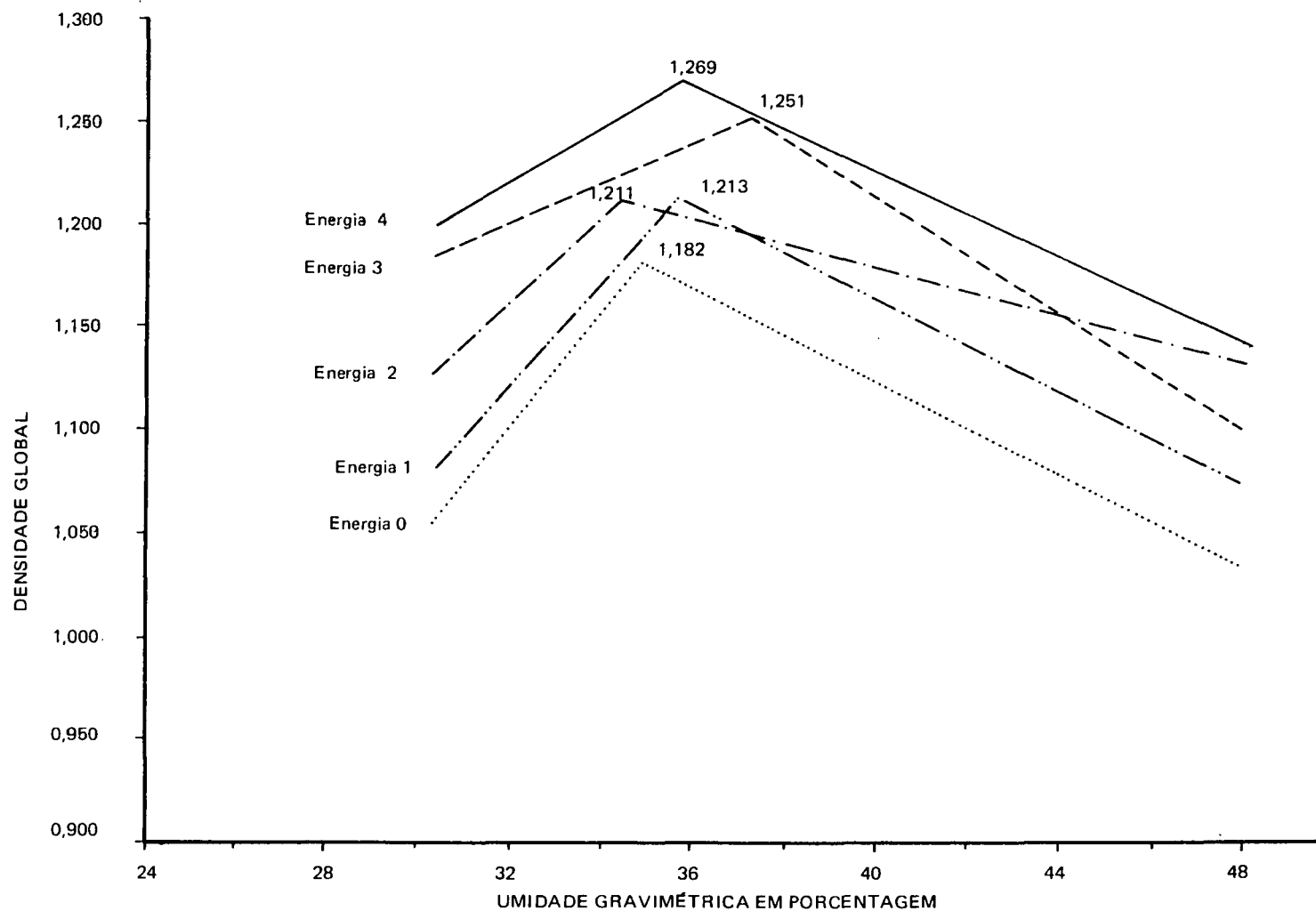
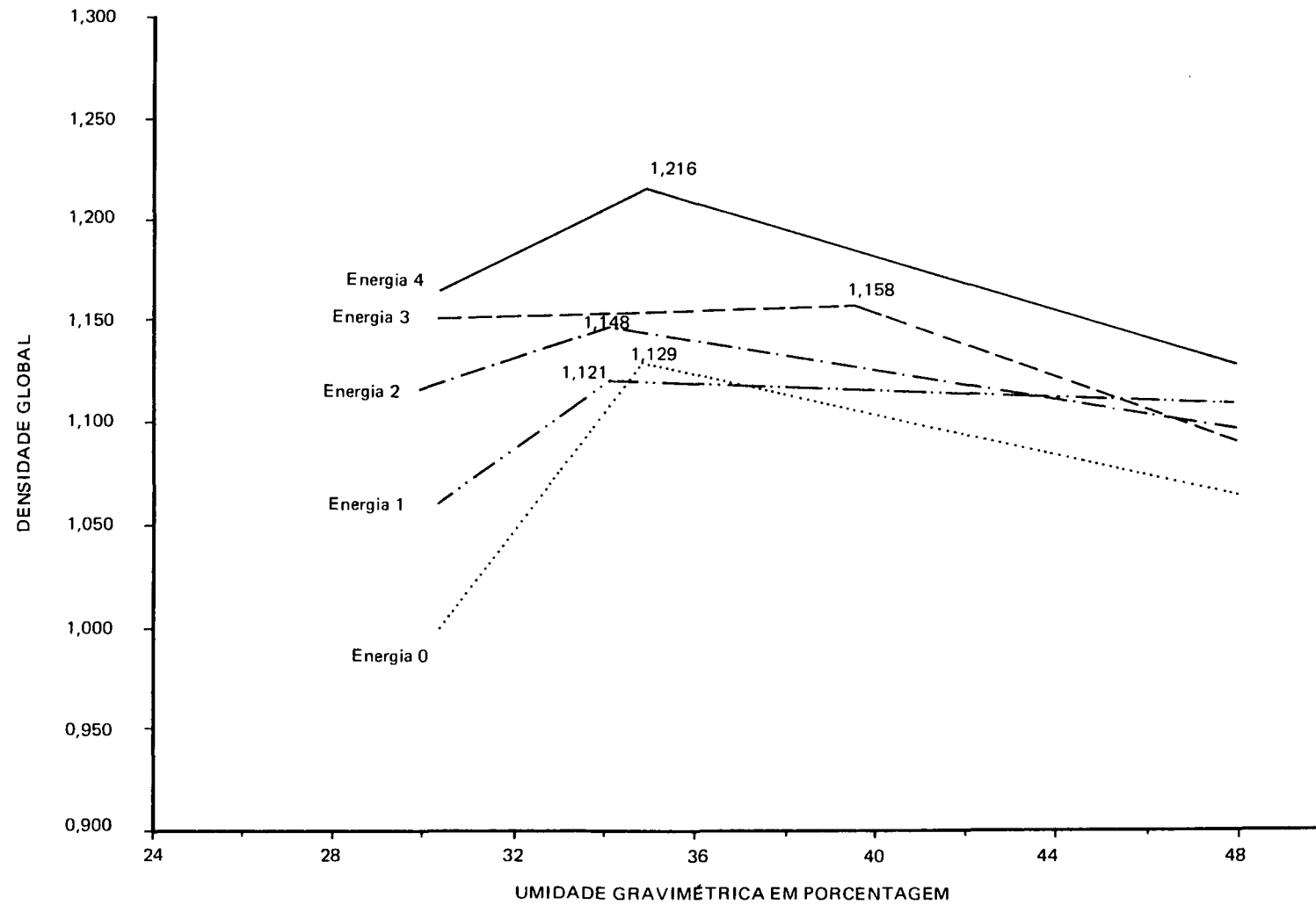
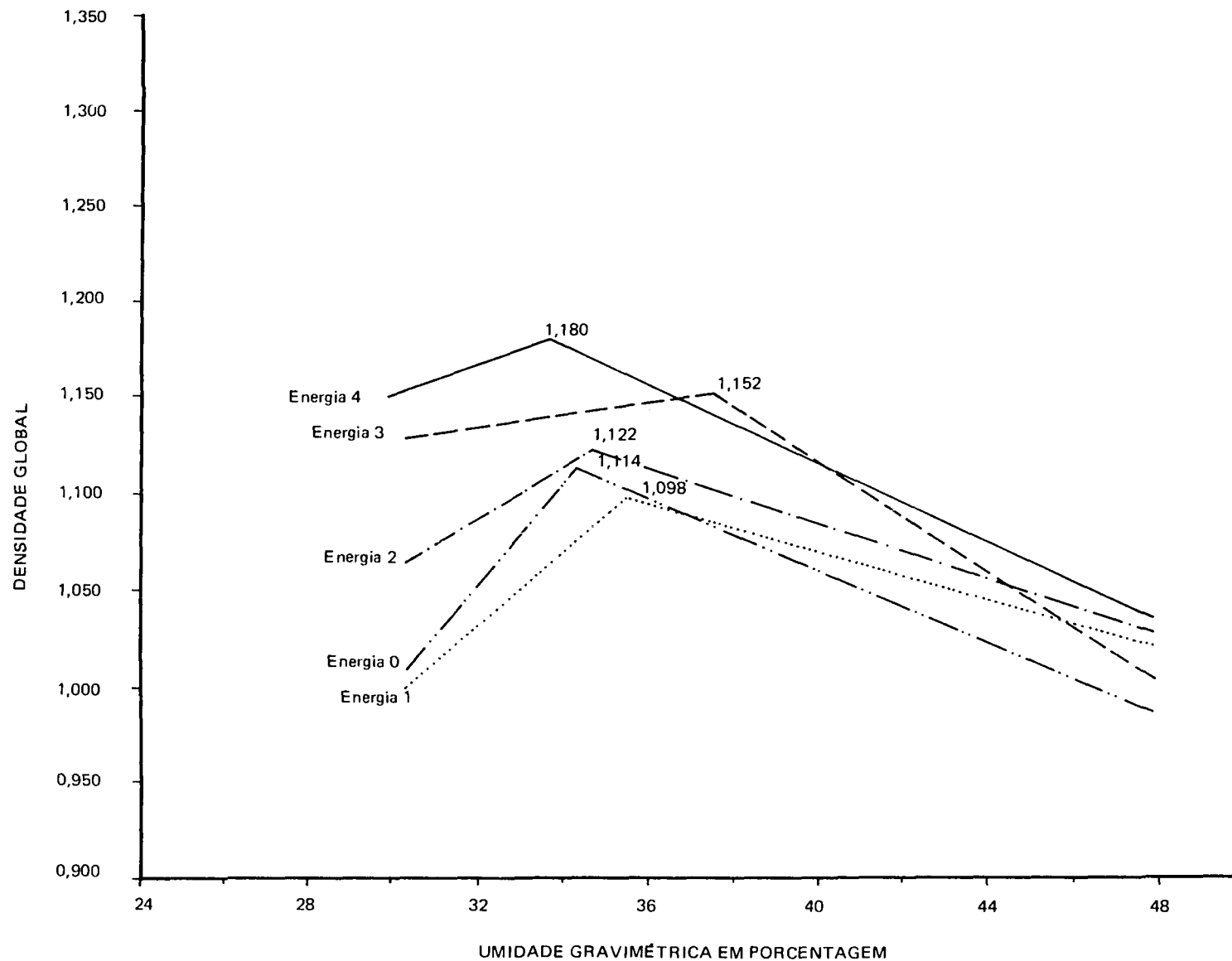


FIGURA 26 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL DO SOLO EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE.

GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS VARIAÇÕES DE ENERGIAS NA PROFUNDIDADE 1



**FIGURA 27 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL DO SOLO EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE.
GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS VARIAÇÕES DE ENERGIAS NA PROFUNDIDADE 2**



**FIGURA 28 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE GLOBAL DO SOLO EM FUNÇÃO DA ENERGIA APLICADA E DA UMIDADE.
GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS VARIAÇÕES DE ENERGIAS NA PROFUNDIDADE 3**

elaborados levando-se em consideração, além da umidade e da densidade de massa, a profundidade em que foi feita a coleta de amostras (figuras 9, 13, 17, 21 e 25).

As figuras 26 a 28 demonstram os efeitos, em profundidade, de compactação provocada pela intensidade da energia aplicada ao solo. A cada incremento de energia correspondeu a um aumento da densidade global na mesma umidade.

5.2.1 - Energia Zero (E_0)

Este procedimento foi utilizado com o objetivo de analisar a variação da densidade de massa do solo em relação às variações de umidade em condições naturais, para desta forma, servir de testemunha em relação às outras parcelas onde foram aplicadas quatro diferentes energias.

Nas figuras de 6 a 9 observa-se que o solo apresenta, em condições naturais, variação de densidade de massa de acordo com a variação da umidade, mesmo não sendo submetido a um processo mecânico de compactação. Estes resultados comprovam as afirmações de CAMARGO (1983) de que os fatores naturais ou genéticos atuam, embora de forma lenta, no processo de compactação do solo. Este fenômeno faz parte da própria evolução do solo, onde os materiais muito finos, ao serem arrastados da superfície, preenchem parte dos poros das camadas inferiores. Além disso o processo de secagem e umedecimento, também podem causar alteração na estrutura do solo.

As curvas da Energia E_0 , nas três profundidades,

tiveram um comportamento idêntico ao das curvas que sofreram compactação artificial, variando apenas quanto aos valores de densidade que foram menores. Até mesmo o ponto de umidade ótima para compactação (U_0), confirmou a tendência e ficou entre 34 a 36% de umidade gravimétrica. Observou-se, inclusive a variação das densidades em profundidade com a variação da umidade (figura 9) obtendo-se maiores valores de densidade global na camada 1 (10 a 15 cm) e menores na profundidade 3 (20 a 25 cm). Além disso pode ter ocorrido efeito de pisoteio de trator ao efetuar o corte de grama antes da instalação do experimento.

5.2.2 - Energias E_1 , E_2 , E_3 , e E_4

As figuras 10 a 28 mostram os efeitos das diferentes energias aplicadas no ensaio.

A variação da energia se deu em função do número de golpes que cada parcela recebeu antes de ser feita a coleta. Os efeitos foram observados através da variação da densidade global. A medida que a energia foi sendo aumentada, sem que houvesse variação da umidade, houve um correspondente aumento dos valores de densidade global, caracterizando a compactação do solo. Este efeito foi observado, conforme mostram os gráficos, em todas as energias, concordando com os dados encontrados anteriormente por FAURE (1978), SILVA (1986) e VIANA (1988).

As figuras 13, 17, 21 e 25, demonstram ainda o efeito da compactação em profundidade no solo. Das quatro diferentes energias aplicadas, apenas a energia E_1 (2,45

J/cm²) não apresentou alterações em profundidade em relação à testemunha (como pode ser observado na figura 4), embora tenha apresentado diferença na primeira camada. Nas demais energias E₂, E₃, e E₄, todas apresentaram acréscimo nos valores de densidade de massa nas três profundidades, sendo que os maiores efeitos da compactação que o solo sofreu, foram observados na primeira camada (10 a 15 cm), e os menores na terceira camada (20 a 25 cm), caracterizando o efeito dissipador produzido pelo solo quando submetido a uma energia.

Em termos médios, considerando-se as três camadas, a densidade de massa variou de 1,145 g/cm na energia E₁ (2,45 j/cm²) até 1,221 g/cm³ na Energia E₄ (9,80 j/cm²).

Nas três profundidades, a densidade de massa aumentou com a umidade, até o ponto considerado "ótimo" para compactação, na faixa de 34 a 36% de umidade gravimétrica. A partir de U₀ a medida que a umidade foi aumentando a densidade foi diminuindo, confirmando as afirmações de CAMARGO (1983), FAURE (1978), VIANA (1988) e SILVA (1986). É importante ressaltar que como a U₀ varia de acordo com as características de cada tipo de solo, a faixa citada anteriormente refere-se ao Latossolo Vermelho Escuro, textura argilosa, objeto do presente estudo. De qualquer forma, por ser a umidade um fator determinante no processo de compactação, é importante que se conheça bem esta faixa em cada tipo de solo para que se possa avaliar com segurança as melhores condições para as práticas de uso, manejo e conservação do solo.

5.3 - Resistência à Penetração

As figuras 29 a 34 mostram que existe uma relação linear entre umidade e resistência à penetração em todas as energias aplicadas. Para cada variação de umidade houve uma variação inversa na resistência a penetração, representada pelo Índice de Cone. Estes dados alertam que é imprescindível levar em consideração a umidade ao se usar a resistência à penetração para aferir o estado de compactação de um solo. A medida que diminuiu a umidade, aumentou a resistência à penetração (IC). A medida que aumentou o conteúdo de água, diminuiu a resistência do solo à penetração.

5.4 - Interação entre Energia Aplicada Resistência à Penetração, Densidade e Umidade

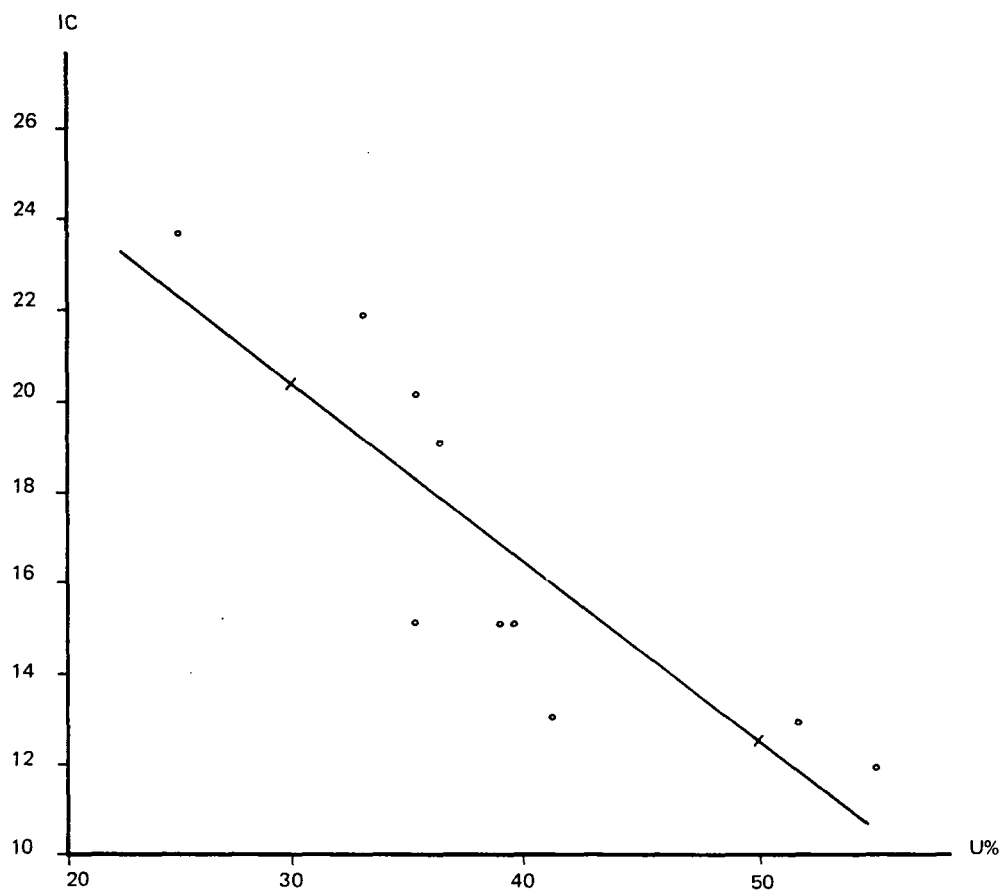
A figura 35 demonstra que existe uma clara relação entre a resistência à penetração, medida através do Índice de Cone (IC), e a umidade. No ramo úmido, quanto mais seco apresentava-se o solo maior resistência à penetração ofereceu. Por outro lado, foi nestas condições (mais seco) que efeito da compactação foi menor, obtendo-se as menores variações dos valores de densidade global nas diferentes energias aplicadas.

No ramo molhado, a medida que aumentou-se a umidade, diminuiu a densidade global do solo, independente da energia aplicada. Da mesma forma diminuiu a resistência do solo à penetração numa relação direta com a densidade, ao contrário do que aconteceu no ramo úmido, limitando a

$$Y = 31.760 - 0,382 x$$

$$R = 0,715$$

IC (K pa)	U%
21,80	33,30
23,64	24,70
19,84	35,80
12,74	41,50
18,89	35,90
15,31	35,30
15,26	39,00
15,03	39,39
11,90	55,90
13,47	51,10



VALORES CALCULADOS

U = 30%

IC = 20,30

U = 50%

IC = 12,66

**FIGURA 29 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA E PENETRAÇÃO
(ÍNDICE DE CONE - IC) E UMIDADE (U%) NA ENERGIA O
(Eo). (1ª Camada)**

$$Y = 39,200 - 0,544 x \quad R = 0,847$$

IC (K Pa)	U%	U%
12,69		50,90
15,26		46,10
15,15		42,00
16,49		41,50
14,81		40,80
15,54		39,30
19,84		38,30
21,18		35,80
22,25		31,80
25,04		27,30

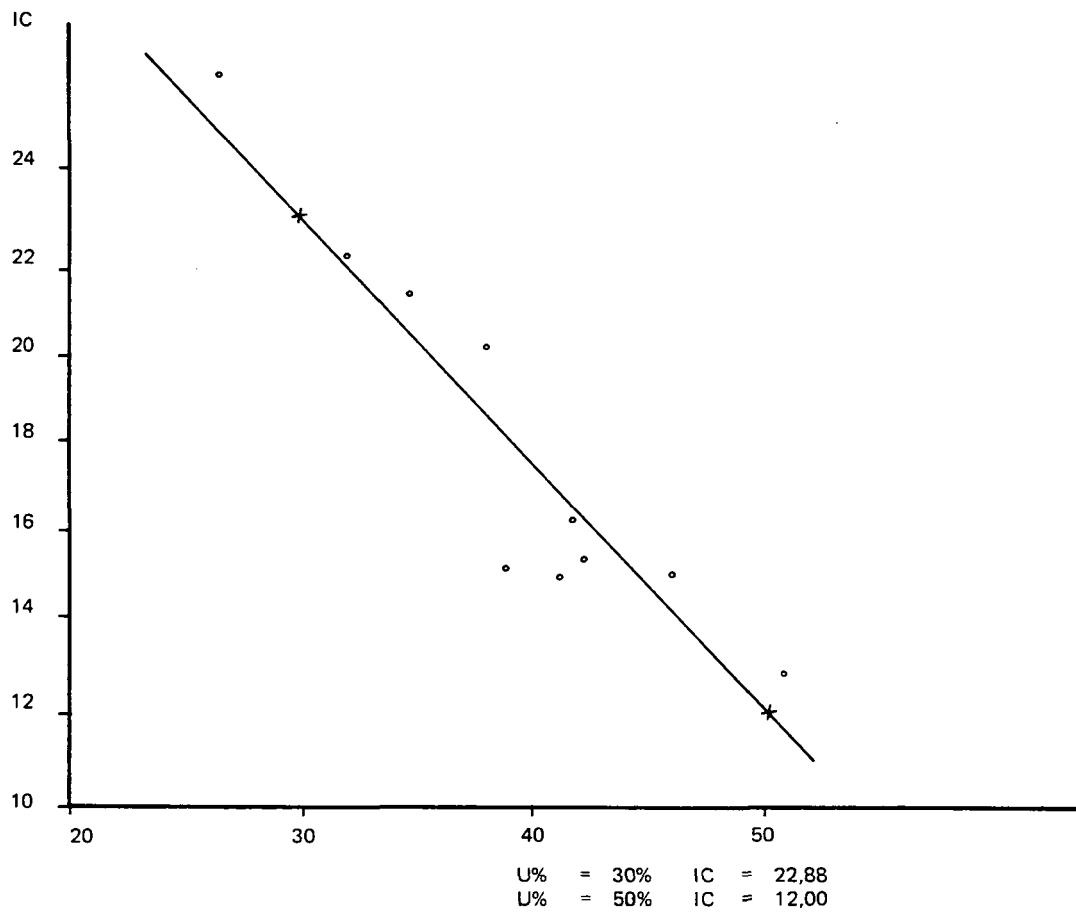


FIGURA 30 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (ÍNDICE DE CONE = IC) E UMIDADE (U%) NA ENERGIA 1 (E1). (1ª camada)

$$Y = 38,238 - 0,476 x \quad R = 0,706$$

IC (K Pa)	U%
16,49	51,30
19,33	43,40
13,92	42,40
17,49	40,20
16,10	39,40
17,72	39,10
21,69	36,70
21,63	36,00
25,15	33,00
26,10	25,60

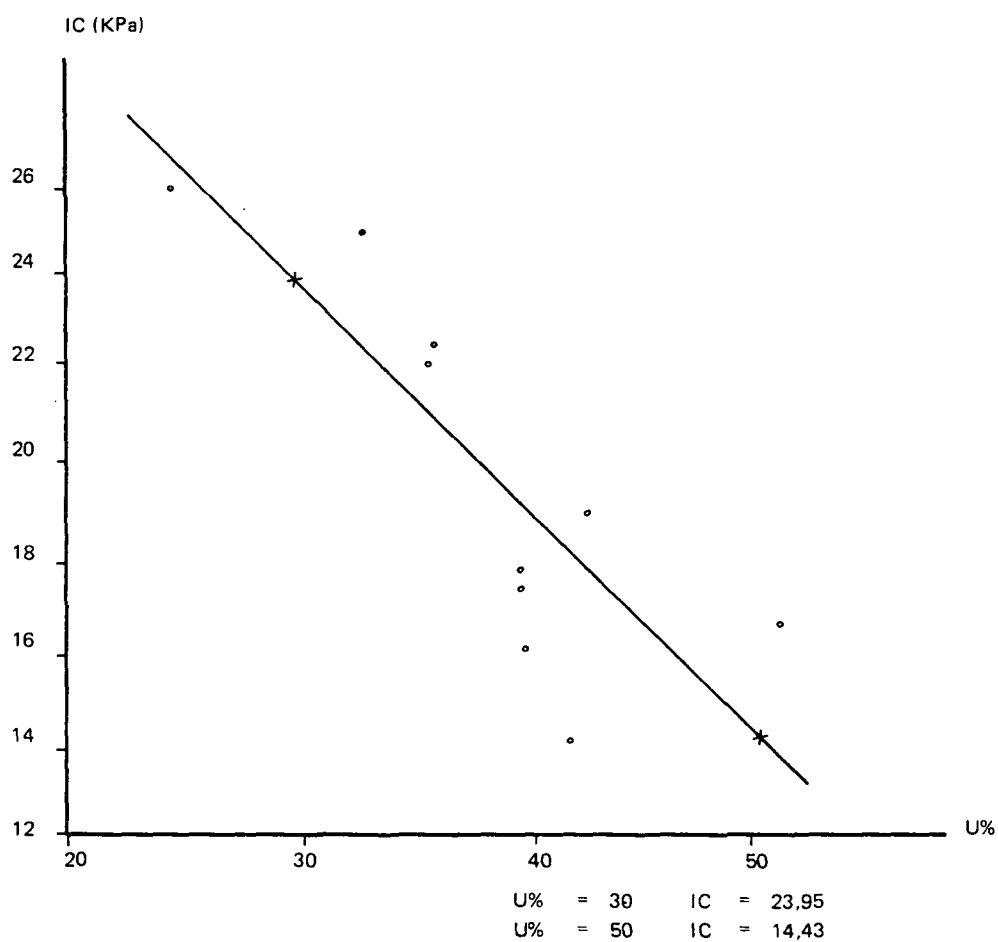


FIGURA 31 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (ÍNDICE DE CONE - IC) E UMIDADE (U%) NA ENERGIA 2 (E1). (1ª camada)

$$Y = 31,954 - 0,3221 x \quad R = 0,804$$

IC (K Pa)	U%
16,04	50,20
17,55	47,60
18,72	45,10
17,72	39,70
16,88	39,20
19,17	36,40
21,13	35,80
21,69	34,20
23,08	31,20
24,65	23,60

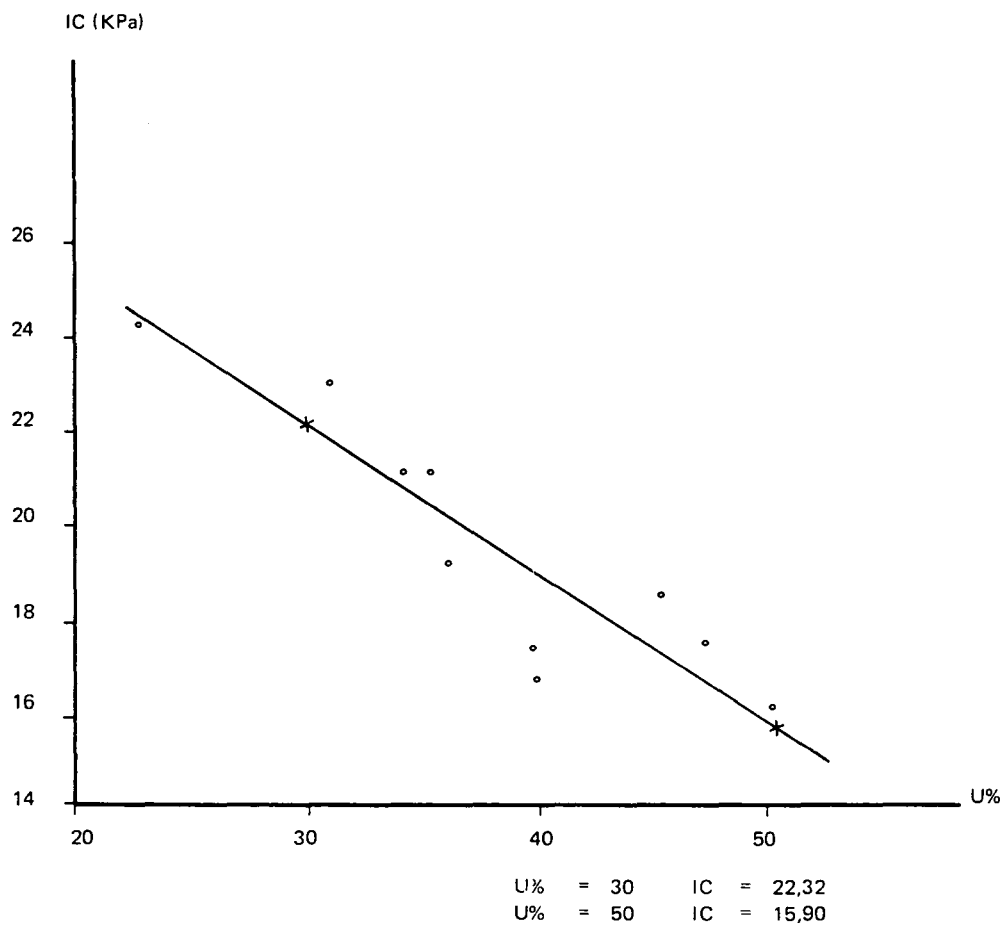


FIGURA 32 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (ÍNDICE DE CONE - IC) E UMIDADE (U%) NA ENERGIA 3 (E3). (1ª camada)

$$Y = 36,027 - 0,429 x \quad R = 0,740$$

IC (K Pa)	U%
19,56	44,80
17,49	43,80
15,82	41,50
16,15	40,80
17,72	40,50
20,34	39,00
20,01	37,00
21,69	34,70
24,48	31,70
25,77	22,30

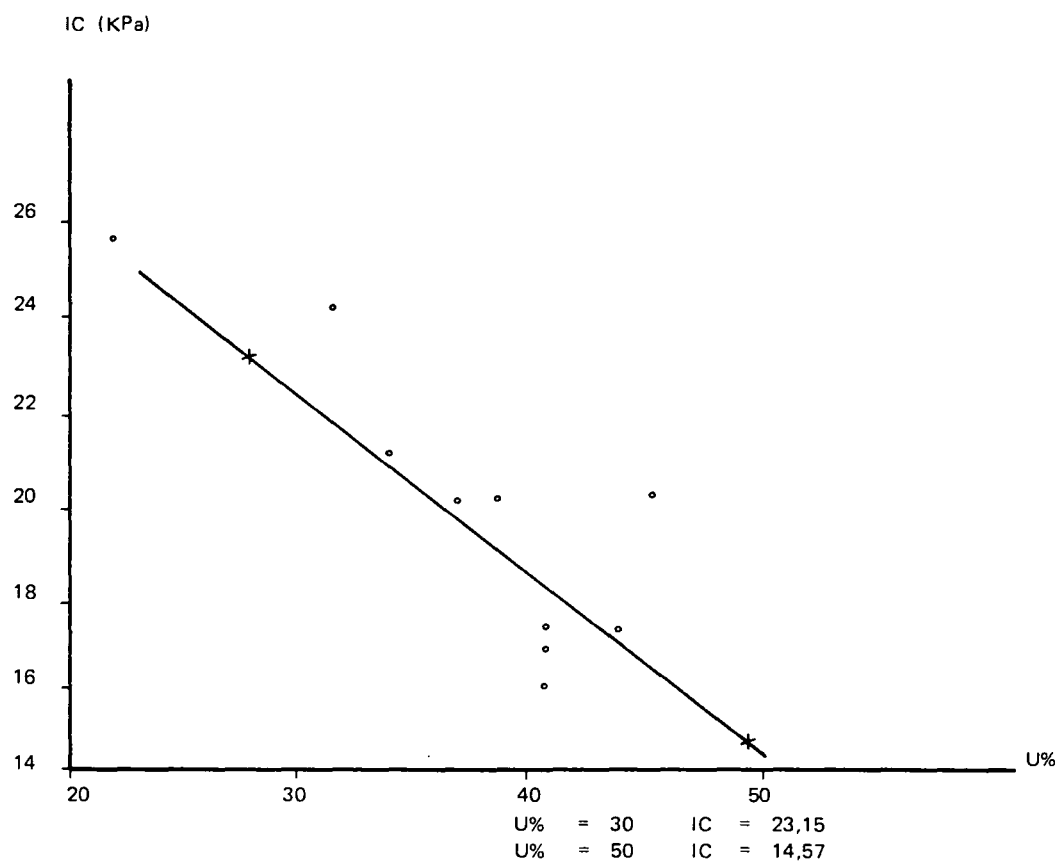


FIGURA 33 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (ÍNDICE DE CONE - IC) E UMIDADE (U%) NA ENERGIA 4 (E4). (1ª camada)

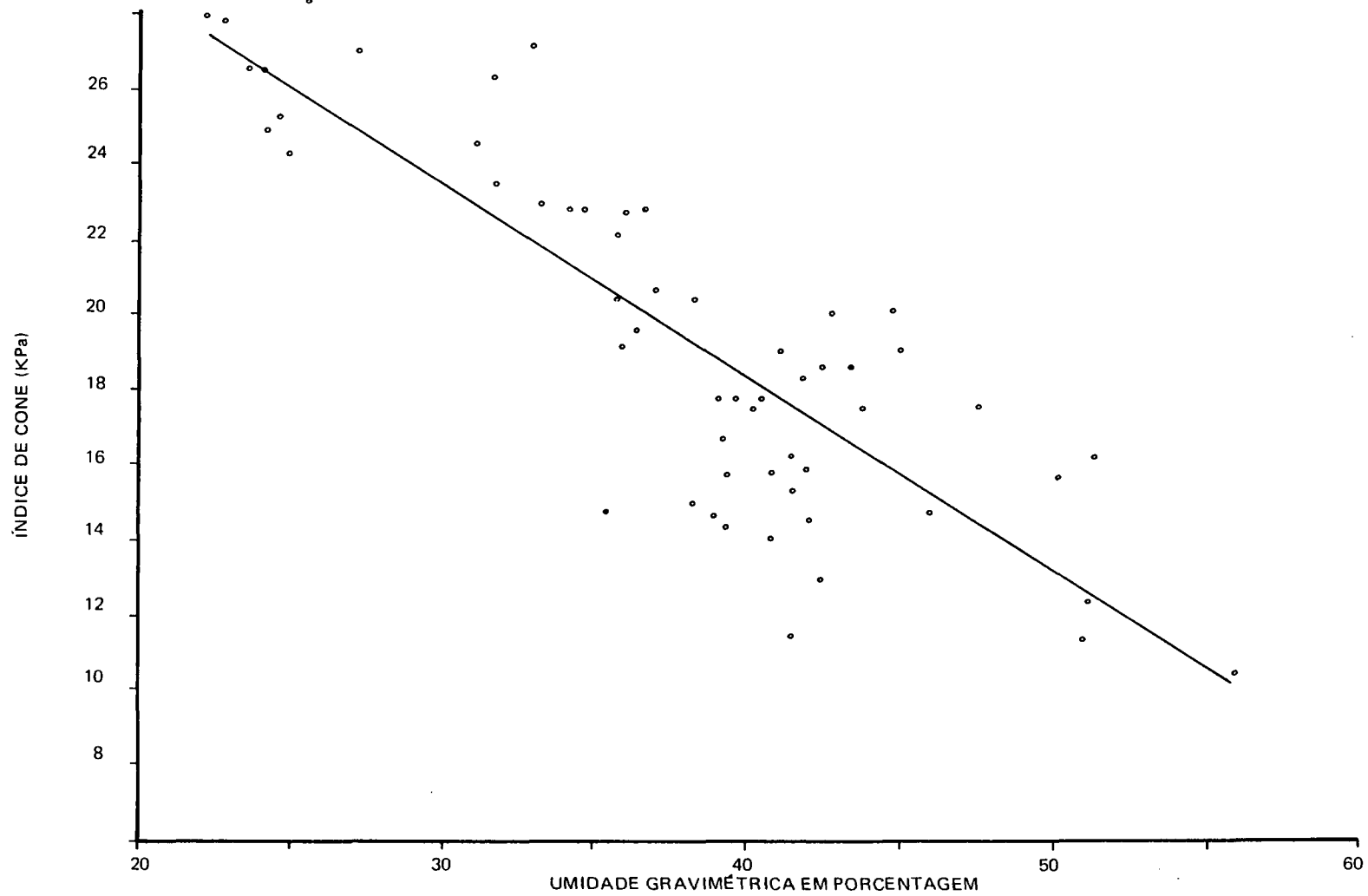


FIGURA 34 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE CONE (IC) EM RELAÇÃO A UMIDADE (U%) EM TODAS AS ENERGIAS VALORES OBTIDOS NO CAMPO (60 Amostras)

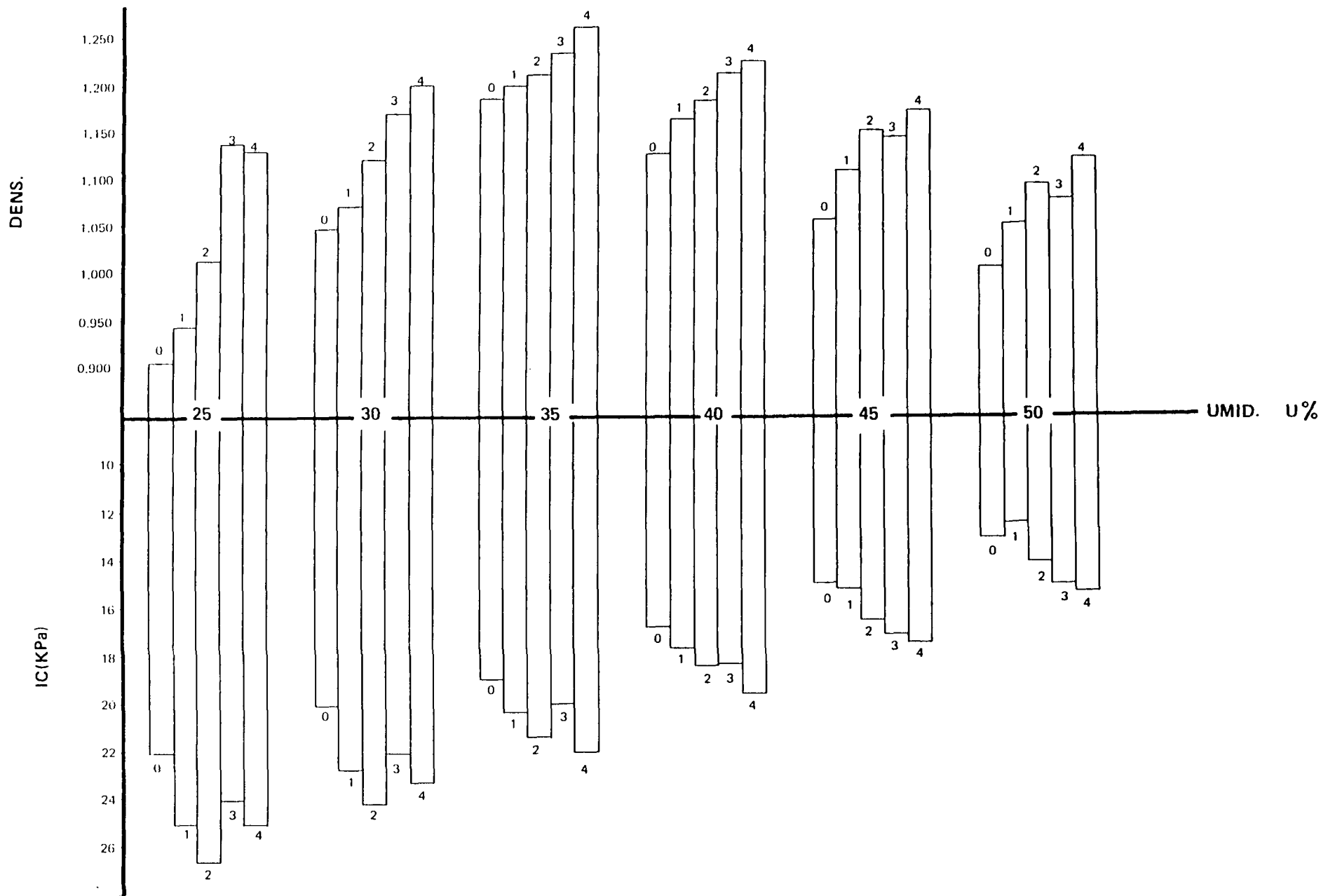


FIGURA 1 - INTERAÇÕES ENTRE VALORES CALCULADOS DE ENERGIA, RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO, DENSIDADE E UMIDADE (1ª CAMADA)

eficiência do uso desse tipo de penetrômetro para este estado de umidade do solo.

Observou-se ainda que no ramo úmido os maiores valores de densidade global obtidos no experimento, não corresponderam aos maiores valores de resistência à penetração. Os valores máximos de densidade global variaram diretamente com o aumento da energia aplicada e da umidade, enquanto que na variação da resistência à penetração, a dependência foi sempre maior da umidade e menor das energias aplicadas. O solo ofereceu sempre maior resistência à penetração quando apresentou-se com menor umidade.

A figura 36 elaborada a partir da tabela 12 em anexo, mostra que a relação entre o Índice de Cone e a densidade global do solo só foi observada no ramo molhado da curva de compactação (para umidades gravimétricas acima de 35%). Neste caso, a medida que aumentou-se a umidade do solo diminuiu-se a resistência à penetração e a densidade global do solo.

Em ambos os casos, observa-se que foi a variação da umidade que determinou o comportamento da resistência à penetração e da densidade do solo em todas as energias aplicadas durante o experimento.

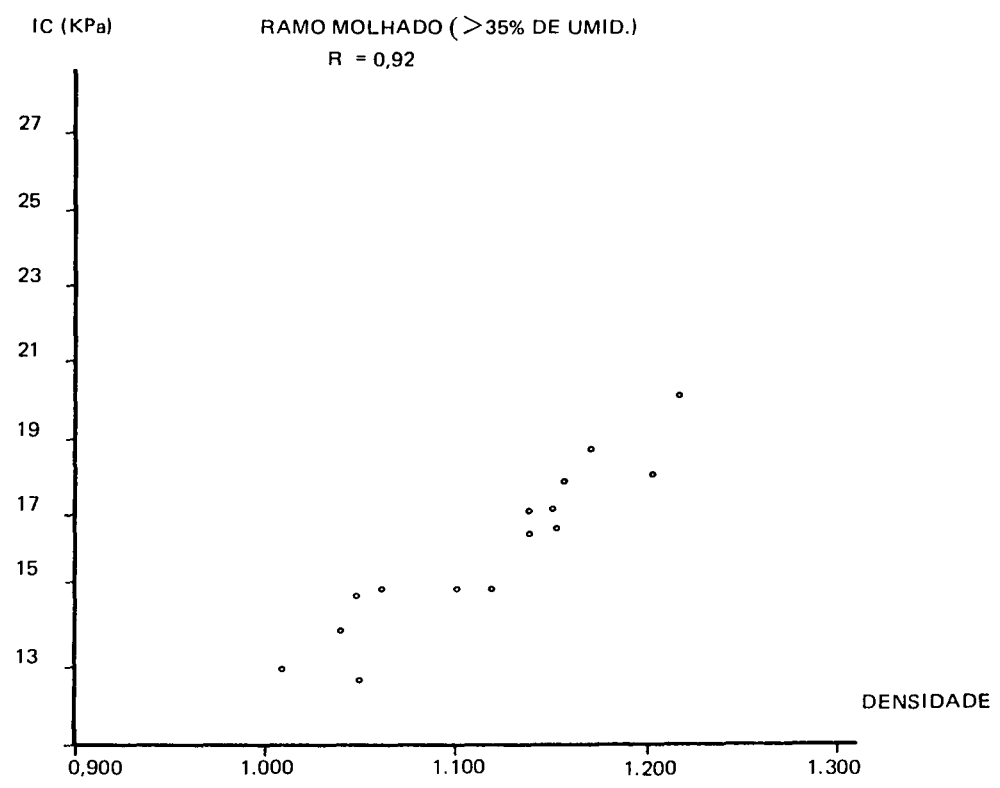
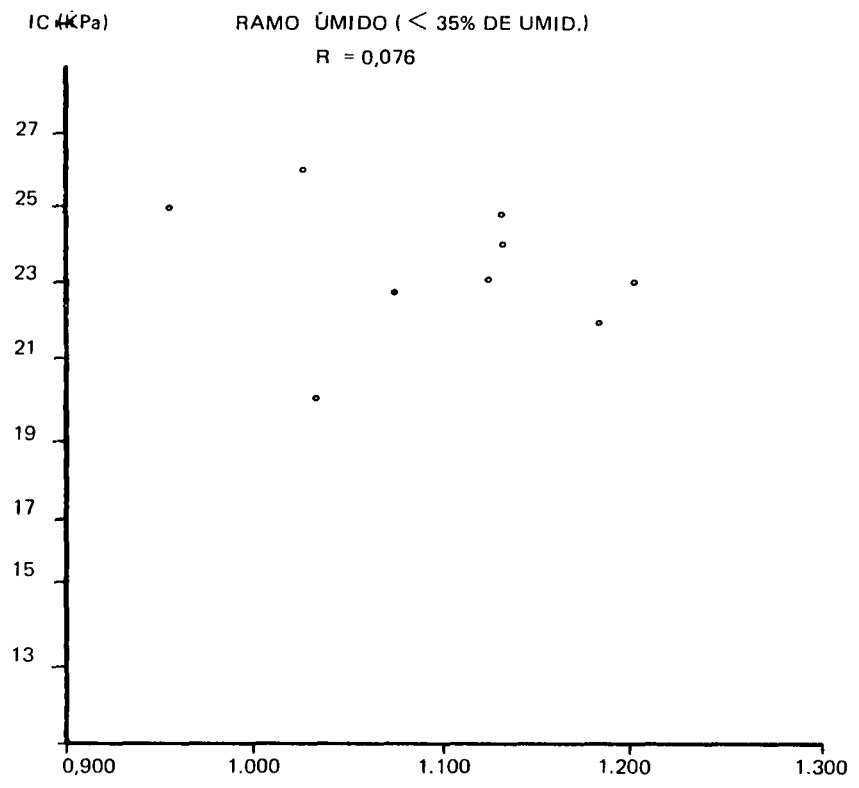


FIGURA 36 – RELAÇÃO ENTRE AS VARIAÇÕES DA DENSIDADE E DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (ÍNDICE DE CONE) EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO SOLO NOS RAMOS ÚMIDO E MOLHADO.

6 - CONCLUSÕES

Com a metodologia adotada e os resultados obtidos foi possível obter as seguintes conclusões para o solo estudado:

.a aplicação gradual de energia sobre o solo alterou de forma também gradual a sua densidade global, independentemente da umidade. Considerando-se que a densidade global expressa o estado de compactação do solo, para uma mesma umidade, quanto maior a energia aplicada maior foi a compactação provocada;

.para uma mesma energia, a densidade global variou com a umidade. As maiores densidades foram obtidas quando o solo apresentou-se ao redor de 35% de umidade gravimétrica. Em teores maiores ou menores de água no solo, independentemente das energias aplicadas, as densidades foram menores, caracterizando claramente um ramo ascendente e um ramo descendente da curva de compactação. No ramo ascendente (ramo úmido) a cada incremento de energia aplicado correspondeu a um aumento na densidade global. No ramo descendente (ramo molhado) a cada incremento de energia correspondeu a uma diminuição da densidade, mostrando a faixa de umidade onde a sensibilidade à compactação é máxima;

.a variação da densidade global em função da

variação da energia aplicada e da umidade afetou a porosidade total do solo. Como consequência houve redução gradativa da macroporosidade e aumento da microporosidade proporcionalmente à energia aplicada. Na energia 4 ($9,80 \text{ J/cm}^2$), a macroporosidade chegou a valores de 0,5%;

.o equipamento utilizado (adaptação do aparelho PROCTOR) produz resultados semelhantes aos obtidos em laboratório, sendo viável sua utilização a campo para estudos de compactação de solos em condições naturais, tendo como único fator limitante o controle da umidade;

.mesmo em condições naturais (sem aplicação de energia) o solo apresentou variação na sua densidade global de acordo com o conteúdo de água, caracterizando a existência de variação natural no seu estado de compactação;

.no ramo molhado da curva de compactação, existe uma relação direta entre a resistência à penetração e a densidade global do solo. No ramo úmido esta tendência é inversa mas pouco consistente, demonstrando que o uso do penetrômetro apresenta limitações para caracterizar o estado de compactação do solo quando este se encontra abaixo da umidade ótima de compactação;

.ao se utilizar os valores de densidade global e de resistência à penetração como parâmetros para estabelecer o estado de compactação de um solo deverão estar, sempre, associados aos valores de umidade do solo que eles foram obtidos.

7 - RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho justificam as seguintes recomendações:

1 - O uso do penetrômetro para determinar o grau de compactação, terá que estar relacionado ao conteúdo de umidade do solo no momento da medição. A resistência à penetração varia muito mais com o conteúdo da umidade do solo do que com a densidade. Um solo com mesma densidade, apresentará índices de resistência à penetração diferentes se os conteúdos de umidades forem diferentes. Portanto sua utilidade fica limitada a medida feita para o mesmo solo à mesma umidade.

2 - As operações de preparo do solo, tratos culturais, colheita e transporte, devem ser feitas quando o solo apresentar o mínimo de umidade possível, de acordo com as necessidades da operação, de forma a interferir o mínimo possível na estrutura do solo. Nas condições apresentadas pelo solo do presente estudo, recomenda-se trabalhar com umidade gravimétrica inferiores a 30%, sendo que 35% é a umidade ótima para compactação.

3 - Recomenda-se ampliar os estudos em condições semelhantes quanto a condutividade hidráulica, penetração de raízes, aeração, absorção de nutrientes, etc..., ampliando

os conhecimentos na área, demonstrando seus efeitos diretamente sobre as plantas.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. 1973. *Física del Suelos*. México, Ed. Hispano-Americana. 529 p.
- 2 - BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A.P. TAYLOR, J.C. 1981. *Estrutura e Compactação na Permeabilidade de Solos do Rio Grande do Sul*. *Rev. Bras. Ciência do Solo*, 5:145-149.
- 3 - BOWEN, J.E. KRATKY, B.A. 1985. *Compaction del Suelo. Agricultura de las Américas*. (6): 10-14.
- 4 - BRADFORD, J.M. & GUPTA, S.C. 1976. *Soil Compressibility*. In: *Methods of Soil Analysis*. 2. Ed. Madison, American Soc. Agronomy. Part 1, Agronomy Series, n. 9.
- 5 - BRASIL M.A. 1974. Centro de Pesquisas Pedológicas. *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná, 1 parte*. Curitiba-PR. 150 p. (Boletim Técnico n. 40).
- 6 - CAMARGO, O.A. 1983. *Compactação do Solo e Desenvolvimento de Plantas*. Campinas, Fundação CARGILL, 44 p.
- 7 - CINTRA, F.L.D. 1980. *Caracterização do Impedimento Mecânico em Latossolos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia.
- 8 - EMBRAPA-SNLCS. 1984. *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná*, Boletim Técnico n. 57, 2t. Londrina.
- 9 - FERNANDES B.; GALLOWAY H.M.; BRONSON R.D.; MANNERING J.V. 1982. *Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros em dois solos*. *Rev. Bras. Ciência do Solo*. 7:329-333.

- 10 - FAURE, A. 1978. **Comportament des sols au compatage: rolê de L'argile et consequence sur l'arrangement des grains.** s.l. 179 p. Tese. Doutorado. Université Grenoble.
- 11 - GUERRA, M. 1982. **Efeito de Práticas Mecânicas e Culturais sobre Condições Físicas de um Latossolo Roxo Distrófico do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, Dissertação Mestrado. Univ. Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia.
- 12 - IAPAR. 1978. **Cartas Climáticas do Estado do Paraná.** Londrina.
- 13 - MACHADO, J.A.; SOUZA, D.M.P.; BRUM, A.C.R. 1981. **Efeito de anos de Cultivo Convencional em Propriedades Físicas do Solo.** Rev. Bras. Ciência do Solo. 5:187-189.
- 14 - ROLOFF, G. 1986. **Aspectos Dinâmicos da Estrutura de Solos Agrícolas e seu Estudo.** Embaixada do Brasil, Washington. 97 p.
- 15 - SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, D.A. 1986. **Influência da Compactação nas Propriedades Físicas de Dois Latossolos.** Rev. Bras. Ciência do Solo. 10:91-95.
- 16 - SANTOS FILHO, A. 1977. **Genese und Figenschaften repraentativer Bodentypen in der schichtsfulendadschaft des States Paraná, Brasilien.** Freiburg i. Br. Tese Doutorado. Fakultat Albert Ludwigs.
- 17 - VIANA, J.D. 1988. **Relações entre as Características Físicas e os Níveis de Compactação de alguns Latossolos Paranaenses.** Curitiba. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Setor Ciências Agrárias.
- 18 - VETTORI, L. 1969 **Métodos de Análise de Solo.** R.J. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 24 p. (Boletim Técnico, 7).
- 19 - VETTORI, L. PIEREANTONI, H. 1968. **Análise Granulométrica; novo método para determinar a fração argila.** R.J. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 8 p. (Boletim Técnico, 3).

ANEXOS

TABELA 01 - Valores de Umidade e Densidade obtido a Campo(†) e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 0 - divididos em ramo úmido e molhado

UX	PROFUNDIDADE							
	1	2	3	M	1-C	2-C	3-C	M-C
30,30	1,044	1,008	1,015	1,022	1,054	0,996	1,006	1,018
30,50	1,040	0,920	0,967	0,976	1,059	1,002	1,011	1,024
32,30	1,162	1,161	1,112	1,145	1,109	1,055	1,059	1,074
34,60	1,149	1,142	1,134	1,142	1,173	1,122	1,121	1,139
35,30	1,194	1,087	1,109	1,130	1,193	1,143	1,140	1,150

1) r = 0,900355	t = 3,5837		y = 0,208464 + 0,02789 † x t = 10,9634					
2) r = 0,676311	t = 1,5903		y = 0,104467 + 0,02942 † x t = 5,8649					
3) r = 0,847312	t = 2,7633		y = 0,195953 + 0,02673 † x t = 10,1319					
M) r = 0,818508	t = 2,4677		y = 0,169628 + 0,02801 † x t = 9,0214					

35,30	1,194	1,087	1,109	1,130	1,177	1,127	1,105	1,136
37,00	1,140	1,128	1,053	1,107	1,158	1,119	1,089	1,122
38,60	1,107	1,068	1,002	1,059	1,140	1,111	1,074	1,109
39,10	1,108	1,156	1,148	1,137	1,134	1,108	1,069	1,104
39,70	1,167	1,132	1,104	1,134	1,127	1,105	1,063	1,099
40,70	1,126	1,070	1,005	1,067	1,116	1,100	1,054	1,090
41,60	1,135	1,146	1,112	1,131	1,106	1,096	1,045	1,082
42,30	1,103	1,113	1,007	1,074	1,098	1,092	1,039	1,076
42,60	1,117	1,107	1,030	1,085	1,094	1,091	1,036	1,074
43,60	1,058	1,102	1,055	1,072	1,083	1,086	1,026	1,065
45,30	1,022	0,993	0,999	1,005	1,064	1,077	1,010	1,051
48,00	1,052	1,073	0,968	1,031	1,033	1,064	0,985	1,028

1) r = -0,82840	t = 4,6769		y = 1,578290 - 0,01136 † x t = 16,2457					
2) r = -0,39707	t = 1,3682		y = 1,301701 - 0,00495 † x t = 8,5634					
3) r = -0,58718	t = 2,2940		y = 1,438059 - 0,00944 † x t = 9,8169					
M) r = -0,70603	t = 3,1527		y = 1,439350 - 0,00858 † x t = 15,6140					

-M = média entre as três profundidades

-MC= média corrigida

-C = valores corrigidos

† = agrupamento de 60 amostras

TABELA 02 - Valores de Umidade e Densidade obtido a Campo(‡) e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 1 - divididos em ramo úmido e molhado

UX	PROFUNDIDADE							
	1	2	3	M	1-C	2-C	3-C	M-C
30,30	1,049	1,044	1,000	1,031	1,078	1,059	0,998	1,045
30,50	1,085	1,042	0,988	1,038	1,083	1,063	1,002	1,049
32,30	1,176	1,146	1,064	1,129	1,129	1,09	1,037	1,086
34,60	1,197	1,194	1,040	1,129	1,187	1,129	1,081	1,132
35,10	1,167	1,132	1,128	1,142	1,199	1,137	1,091	1,142
35,30	1,208	1,106	1,085	1,113	1,204	1,140	1,095	1,146

1) r = 0,892353	t = 3,9543		y = 0,316067 + 0,02516 ‡ x t = 1,7847					
2) r = 0,752747	t = 2,2869		y = 0,571797 + 0,01609 ‡ x t = 1,5055					
3) r = 0,839714	t = 3,0927		y = 0,412290 + 0,01934 ‡ x t = 1,6794					
M) r = 0,905330	t = 4,2633		y = 0,433385 + 0,02020 ‡ x t = 1,8107					

35,30	1,208	1,106	1,085	1,133	1,216	1,119	1,099	1,145
37,00	1,181	1,116	1,081	1,126	1,197	1,118	1,089	1,135
39,10	1,160	1,101	1,073	1,111	1,174	1,116	1,076	1,122
39,70	1,187	1,121	1,082	1,130	1,167	1,115	1,072	1,110
40,70	1,154	1,114	1,093	1,120	1,156	1,115	1,066	1,112
41,00	1,186	1,135	1,040	1,120	1,152	1,114	1,064	1,110
41,60	1,169	1,136	1,117	1,141	1,146	1,114	1,060	1,107
42,30	1,137	1,117	1,012	1,089	1,138	1,113	1,056	1,102
42,60	1,136	1,128	1,094	1,119	1,134	1,113	1,054	1,101
43,60	1,098	1,102	1,018	1,073	1,123	1,112	1,048	1,095
45,30	1,089	1,082	1,024	1,065	1,104	1,110	1,035	1,084

1) r = -0,86714	t = 5,2232		y = 1,613505 - 0,01125 ‡ x t = 2,6014					
2) r = -0,16214	t = 0,4930		y = 1,151209 - 0,00090 ‡ x t = 0,4864					
3) r = -0,49985	t = 1,7314		y = 1,316862 - 0,00617 ‡ x t = 1,4996					
M) r = -0,70283	t = 2,9641		y = 1,360526 - 0,00610 ‡ x t = 2,1085					

-M = média entre as três profundidades

-MC= média corrigida

-C = valores corrigidos

‡ = agrupamento de 60 amostras

TABELA 03 - Valores de Umidade e Densidade obtido a Campo(*) e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 2 - divididos em ramo úmido e molhado

UZ	PROFUNDIDADE							
	1	2	3	M	1-C	2-C	3-C	M-C
30,30	1,147	1,146	1,114	1,136	1,126	1,120	1,063	1,103
30,50	1,098	1,093	1,024	1,072	1,130	1,122	1,066	1,106
32,30	1,189	1,132	1,073	1,121	1,168	1,135	1,090	1,131
34,60	1,203	1,177	1,123	1,168	1,216	1,151	1,121	1,163
35,30	1,235	1,137	1,138	1,170	1,230	1,156	1,131	1,173

1) r = 0,901672	t = 3,6116		y = 0,494099 + 0,02086 * x t = 0,0698					
2) r = 0,552908	t = 1,1493		y = 0,900077 + 0,00726 * x t = 0,0250					
3) r = 0,670482	t = 1,5653		y = 0,655042 + 0,01347 * x t = 0,0484					
M) r = 0,801229	t = 2,3199		y = 0,683073 + 0,01387 * x t = 0,0478					

35,30	1,235	1,137	1,138	1,470	1,206	1,144	1,118	1,156
37,00	1,176	1,116	1,061	1,118	1,196	1,137	1,106	1,140
38,60	1,163	1,097	1,086	1,115	1,187	1,131	1,094	1,138
39,70	1,183	1,179	1,128	1,163	1,180	1,127	1,086	1,132
40,60	1,135	1,142	1,082	1,120	1,175	1,124	1,080	1,127
40,70	1,171	1,099	1,100	1,123	1,174	1,124	1,079	1,126
41,00	1,207	1,126	1,080	1,138	1,173	1,123	1,077	1,124
41,60	1,200	1,146	1,052	1,133	1,169	1,120	1,073	1,121
42,30	1,194	1,127	1,059	1,127	1,165	1,118	1,068	1,117
42,60	1,164	1,177	1,102	1,148	1,163	1,117	1,066	1,115
43,60	1,106	1,043	1,004	1,051	1,157	1,113	1,059	1,110
45,30	1,139	1,107	1,044	1,097	1,148	1,107	1,047	1,101
48,00	1,150	1,085	1,042	1,092	1,132	1,097	1,028	1,086

1) r = -0,57155	t = 2,3102		y = 1,412076 - 0,00584 * x t = 0,0550					
2) r = -0,33253	t = 1,1694		y = 1,273899 - 0,00369 * x t = 0,0363					
3) r = -0,64020	t = 2,7640		y = 1,367166 - 0,00707 * x t = 0,0727					
M) r = -0,59354	t = 2,4460		y = 1,351047 - 0,00553 * x t = 0,0544					

-M = média entre as três profundidades

-MC= média corrigida

-C = valores corrigidos

* = agrupamento de 60 amostras

TABELA 04 - Valores de Umidade e Densidade obtido a Campo(†) e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 3 - divididos em ramo úmido e molhado

UZ	PROFUNDIDADE							
	1	2	3	M	1-C	2-C	3-C	M-C
30,30	1,190	1,187	1,150	1,176	1,184	1,152	1,128	1,155
30,50	1,188	1,129	1,108	1,142	1,186	1,152	1,128	1,156
34,60	1,237	1,135	1,139	1,170	1,225	1,155	1,142	1,174
35,10	1,187	1,140	1,107	1,145	1,230	1,155	1,144	1,176
35,30	1,236	1,155	1,182	1,191	1,232	1,155	1,145	1,177
37,00	1,269	1,181	1,153	1,201	1,240	1,156	1,151	1,185

1) r = 0,763145	t = 2,3619		y = 0,895415 + 0,00953 * x t = 0,0424					
2) r = 0,063716	t = 0,1277		y = 1,135356 + 0,00056 * x t = 0,0027					
3) r = 0,331439	t = 0,7026		y = 1,022744 + 0,00346 * x t = 0,0165					
M) r = 0,519683	t = 1,2165		y = 1,017838 + 0,00452 * x t = 0,0210					

37,00	1,269	1,181	1,153	1,201	1,255	1,181	1,159	1,198
39,10	1,219	1,144	1,152	1,172	1,225	1,163	1,130	1,173
39,70	1,191	1,179	1,128	1,166	1,217	1,159	1,121	1,166
40,60	1,193	1,106	1,029	1,109	1,204	1,151	1,109	1,155
40,70	1,156	1,143	1,088	1,129	1,203	1,150	1,107	1,150
41,00	1,232	1,177	1,156	1,188	1,198	1,148	1,103	1,150
41,60	1,206	1,184	1,136	1,175	1,190	1,143	1,095	1,143
42,30	1,242	1,124	1,064	1,143	1,180	1,137	1,085	1,134
42,60	1,174	1,140	1,101	1,138	1,176	1,135	1,081	1,130
43,60	1,131	1,115	1,047	1,098	1,162	1,127	1,066	1,118
45,30	1,134	1,109	1,044	1,096	1,138	1,113	1,042	1,098

1) r = -0,72114	t = 3,1228		y = 1,778177 - 0,01414 * x t = 0,0793					
2) r = -0,60947	t = 2,3063		y = 1,483284 - 0,00818 * x t = 0,0480					
3) r = -0,66076	t = 2,6410		y = 1,681184 - 0,01410 * x t = 0,0863					
M) r = -0,75093	t = 3,4114		y = 1,647548 - 0,01214 * x t = 0,0711					

-M = média entre as três profundidades

-MC= média corrigida

-C = valores corrigidos

* = agrupamento de 60 amostras

TABELA 05 - Valores de Umidade e Densidade obtido a Campo(*) e valores corrigidos nas três profundidades - Energia 4 - divididos em raço úmido e molhado

U%	PROFUNDIDADE							
	1	2	3	M	1-C	2-C	3-C	M-C
30,30	1,192	1,176	1,178	1,182	1,190	1,164	1,154	1,172
30,50	1,196	1,145	1,140	1,160	1,200	1,166	1,155	1,174
32,30	1,253	1,210	1,179	1,214	1,224	1,187	1,169	1,193
34,60	1,242	1,197	1,142	1,194	1,255	1,218	1,187	1,218
35,30	1,303	1,248	1,284	1,262	1,287	1,239	1,205	1,244

1) r = 0,88611	t = 3,8237		y = 0,795237 + 0,01328 * x t = 0,0574					
2) r = 0,87076	t = 3,5418		y = 0,823885 + 0,01123 * x t = 0,0503					
3) r = 0,60990	t = 1,5392		y = 0,919027 + 0,00774 * x t = 0,0353					
M) r = 0,84375	t = 3,1439		y = 0,846050 + 0,01075 * x t = 0,0479					

37,00	1,303	1,248	1,234	1,262	1,256	1,201	1,147	1,201
38,60	1,216	1,168	1,069	1,151	1,239	1,191	1,130	1,187
39,10	1,199	1,187	1,136	1,174	1,234	1,187	1,125	1,187
39,70	1,207	1,191	1,069	1,156	1,228	1,183	1,119	1,177
40,60	1,208	1,159	1,094	1,154	1,218	1,177	1,110	1,168
40,70	1,210	1,144	1,089	1,148	1,217	1,176	1,109	1,168
41,00	1,234	1,188	1,141	1,191	1,214	1,174	1,106	1,165
41,60	1,223	1,120	1,038	1,127	1,208	1,170	1,100	1,159
42,30	1,242	1,182	1,096	1,173	1,201	1,166	1,093	1,153
42,60	1,192	1,205	1,149	1,182	1,198	1,164	1,090	1,150
43,60	1,154	1,140	1,106	1,133	1,187	1,157	1,080	1,142
45,30	1,148	1,136	1,020	1,101	1,170	1,146	1,062	1,126
48,00	1,164	1,149	1,063	1,125	1,141	1,127	1,035	1,101

1) r = -0,73247	t = 3,5683		y = 1,640692 - 0,01040 * x t = 0,0827					
2) r = -0,56885	t = 2,2940		y = 1,449979 - 0,00672 * x t = 0,0553					
3) r = -0,53278	t = 2,0881		y = 1,521724 - 0,01014 * x t = 0,0888					
M) r = -0,66857	t = 2,9818		y = 1,537464 - 0,00909 * x t = 0,0754					

-M = média entre as três profundidades

-MC= média corrigida

-C = valores corrigidos

* = agrupamento de 60 amostras

TABELA 06 - Valores corrigidos de Densidade Global em todas as unidades obtidas a campo e Pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 0)

Umidade	Profundidade			
	1	2	3	M
30,30	1,054	0,996	1,006	1,018
30,50	1,059	1,002	1,011	1,024
32,30	1,409	1,055	1,059	1,074
34,34	1,166	1,115	<u>1,114</u>	1,132
34,60	1,173	1,122	1,111	1,139
34,70	1,176	1,125	1,110	<u>1,142</u>
34,83	1,180	<u>1,129</u>	1,409	1,140
34,90	<u>1,182</u>	1,129	1,109	1,140
35,30	<u>1,177</u>	1,127	1,105	1,136
37,00	1,158	1,119	1,089	1,122
38,60	1,140	1,111	1,074	1,108
39,10	1,134	1,108	1,069	1,104
39,70	1,127	1,105	1,063	1,099
40,70	1,116	1,100	1,054	1,090
41,60	1,406	1,096	1,045	1,082
42,30	1,098	1,092	1,039	1,076
42,60	1,094	1,091	1,036	1,074
43,60	1,083	1,086	1,026	1,065
45,30	1,064	1,077	1,010	1,051
48,00	1,033	1,064	0,985	1,028

- M = média

TABELA 07 - Valores corrigidos de Densidade Global em todas as unidades obtidas a campo e Pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 1)

Unidade	Profundidade			
	U%	1	2	3
30,30	1,078	1,059	0,998	1,045
30,50	1,083	1,063	1,002	1,049
32,30	1,129	1,092	1,037	1,086
34,10	1,174	<u>1,121</u>	1,072	1,122
34,60	1,187	<u>1,120</u>	1,081	1,132
35,10	1,199	1,120	1,091	1,142
35,25	1,203	1,119	1,094	<u>1,145</u>
35,30	1,204	1,119	1,095	<u>1,145</u>
35,46	1,208	1,119	<u>1,098</u>	1,144
35,63	<u>1,213</u>	1,119	<u>1,097</u>	1,143
37,00	<u>1,197</u>	1,118	1,089	1,135
39,10	1,174	1,116	1,076	1,122
39,70	1,167	1,115	1,072	1,118
40,70	1,156	1,115	1,066	1,112
41,00	1,152	1,114	1,064	1,110
41,60	1,146	1,114	1,060	1,107
42,30	1,138	1,113	1,056	1,102
42,60	1,134	1,113	1,054	1,101
43,60	1,123	1,112	1,048	1,095
45,30	1,104	1,110	1,037	1,084

- M = média

TABELA 08 - Valores corrigidos de Densidade Global em todas as unidades obtidas a campo e Pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 2)

Umidade	Profundidade			
	1	2	3	M
30,30	1,126	1,120	1,063	1,103
30,50	1,130	1,122	1,066	1,106
34,14	1,206	<u>1,148</u>	1,115	1,157
34,38	<u>1,211</u>	1,147	1,063	1,113
34,42	1,211	1,147	1,063	1,113
34,43	1,211	1,147	1,062	<u>1,161</u>
34,60	1,210	1,146	1,061	1,160
34,67	1,210	1,146	<u>1,122</u>	1,159
35,30	1,206	1,144	1,118	1,156
37,00	1,196	1,137	1,106	1,146
38,60	1,187	1,131	1,094	1,138
39,70	1,180	1,127	1,086	1,132
40,60	1,175	1,124	1,080	1,127
40,70	1,174	1,124	1,079	1,126
41,00	1,173	1,123	1,077	1,124
41,60	1,169	1,120	1,073	1,121
42,30	1,165	1,118	1,068	1,117
42,60	1,163	1,117	1,066	1,115
43,60	1,157	1,113	1,059	1,110
45,30	1,148	1,107	1,047	1,101
48,00	1,132	1,097	1,028	1,086

- M = média

TABELA 09 - Valores corrigidos de Densidade Global em todas as unidades obtidas a campo e Pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 3)

Umidade	Profundidade			
U%	1	2	3	M
30,30	1,184	1,152	1,128	1,155
30,50	1,186	1,152	1,128	1,156
34,60	1,225	1,155	1,142	1,174
35,10	1,230	1,155	1,144	1,176
35,30	1,232	1,155	1,145	1,177
37,00	1,248	1,156	1,151	1,185
37,29	<u>1,251</u>	1,156	1,152	1,186
37,50	1,248	1,156	<u>1,152</u>	1,187
37,80	1,244	1,157	<u>1,148</u>	<u>1,189</u>
39,10	1,225	1,157	1,130	1,173
39,70	1,217	<u>1,158</u>	1,121	1,166
39,81	1,215	<u>1,158</u>	1,120	1,164
40,60	1,204	1,151	1,109	1,155
40,70	1,203	1,150	1,107	1,153
41,00	1,198	1,148	1,103	1,150
41,60	1,190	1,143	1,095	1,143
42,30	1,180	1,137	1,085	1,134
42,60	1,176	1,135	1,081	1,130
43,60	1,162	1,127	1,066	1,118
45,30	1,138	1,113	1,042	1,098

- M = média

TABELA 10 - Valores corrigidos de Densidade Global em todas as unidades obtidas a campo e Pontos de Intersecção (PI) nas três profundidades (Energia 4)

Umidade	Profundidade			
	1	2	3	M
30,30	1,198	1,164	1,154	1,172
30,50	1,200	1,166	1,155	1,174
32,30	1,224	1,187	1,169	1,193
33,71	1,243	1,202	<u>1,180</u>	1,208
34,60	1,255	1,212	1,171	1,218
34,85	1,258	1,215	1,168	<u>1,221</u>
34,88	1,258	<u>1,216</u>	1,168	1,220
35,30	1,264	1,213	1,164	1,217
35,70	<u>1,269</u>	1,210	1,160	1,213
37,00	1,256	1,201	1,147	1,201
38,60	1,239	1,191	1,130	1,187
39,10	1,234	1,187	1,125	1,182
39,70	1,228	1,183	1,119	1,177
40,60	1,218	1,177	1,110	1,168
40,70	1,217	1,176	1,109	1,168
41,00	1,214	1,174	1,106	1,165
41,60	1,208	1,170	1,100	1,159
42,30	1,201	1,166	1,093	1,153
42,60	1,198	1,164	1,090	1,150
43,60	1,187	1,157	1,080	1,141
45,30	1,170	1,146	1,062	1,126
48,00	1,141	1,127	1,035	1,101

- M = Média

TABELA 11 - Dados de resistência à penetração, umidade e densidade global, de amostras obtidas, em diferentes energias aplicadas no solo (valores obtidos no campo).

ENERGIA	PLD	RP IC (KPa)	UMID UZ	DENS (g/cm ³)	
0	2,37	21,80	33,30	1,04	
	2,70	23,64	24,70	0,87	
	2,02	19,84	35,80	0,93	
	0,75	12,74	41,50	0,94	
	Testemunha	1,85	18,89	35,90	1,05
		1,21	15,31	35,30	0,89
		1,20	15,26	39,00	0,87
		1,16	15,03	39,30	1,04
		0,60	11,90	55,90	0,87
		0,88	13,47	51,10	0,83
1 (2,45 J/cm ²)	0,74	12,69	50,90	0,85	
	1,20	15,26	46,10	0,76	
	1,18	15,15	42,00	0,98	
	1,42	16,49	41,50	0,91	
	1,12	14,81	40,80	0,92	
	1,25	15,54	39,30	0,89	
	2,02	19,84	38,30	0,99	
	2,26	21,18	35,80	1,09	
	2,45	22,25	31,80	1,12	
	2,95	25,04	27,30	0,88	
2 (4,90 J/cm ²)	1,42	16,49	51,30	0,90	
	1,75	19,33	43,40	0,90	
	0,96	13,92	42,40	0,98	
	1,60	17,49	40,20	1,07	
	1,35	16,10	39,40	0,98	
	1,64	17,72	39,10	0,85	
	2,35	21,69	36,70	0,88	
	2,34	21,63	36,00	1,01	
	2,97	25,15	33,00	1,03	
	3,14	26,10	25,60	0,92	
3 (7,35 J/cm ²)	1,34	16,04	50,20	0,77	
	1,61	17,55	47,60	0,92	
	1,82	18,72	45,10	0,84	
	1,64	17,72	39,70	0,99	
	1,49	16,88	39,20	0,98	
	1,90	19,17	36,40	0,94	
	2,25	21,13	35,80	0,94	
	2,35	21,69	34,20	0,95	
	2,60	23,08	31,20	1,07	
	2,88	24,65	23,60	0,83	
4 (9,80 J/cm ²)	1,97	19,56	44,80	0,95	
	1,60	17,49	43,80	0,83	
	1,30	15,82	41,50	1,01	
	1,36	16,15	40,80	0,90	
	1,64	17,72	40,50	0,97	
	2,11	20,34	39,00	0,95	
	2,05	20,01	37,00	0,90	
	2,35	21,69	34,70	0,94	
	2,85	24,48	31,70	1,70	
	3,08	25,77	22,30	0,90	

- PLD = Penetrômetro (Leitura Direta)

- UMID = Umidade

TABELA 12 - Dados de Umidade, Densidade e Índice de Cone sob Diferentes Energias (valores corrigidos)

ENERGIA	UMIDADE (U%)	DENSIDADE (g/cm ³)	IC (KPa)
0	25	0,905	22,00
	30	1,045	20,40
	35	1,181	18,77
	40	1,124	16,81
	45	1,067	14,84
	50	1,010	13,05
(2,45 J/cm ²)	25	0,945	25,25
	30	1,071	22,86
	35	1,197	20,45
	40	1,163	17,73
	45	1,107	15,01
	50	1,051	12,45
(4,90 J/cm ²)	25	1,015	26,61
	30	1,120	23,82
	35	1,208	21,06
	40	1,178	18,77
	45	1,149	16,49
	50	1,120	13,95
(7,35 J/cm ²)	25	1,134	24,32
	30	1,182	22,14
	35	1,230	20,00
	40	1,212	18,49
	45	1,142	16,97
	50	1,071	15,13
(9,80 J/cm ²)	25	1,127	24,76
	30	1,194	23,47
	35	1,260	22,12
	40	1,224	19,77
	45	1,172	17,43
	50	1,120	15,61

ANEXO 13

Penetrômetro SOLOTEST - REF. S-210

É utilizado para determinar a resistência à compressão de solos, resistência triaxial de solos, penetração com materiais betuminosos, etc... Sua função é medir a força aplicada em materiais para determinar a capacidade de resistir a cargas variáveis aplicadas sobre esses materiais. É usado no campo ou laboratório, sendo o seu uso muito amplo. A medida obtida no aparelho corresponde a resistência no local ensaiado.

Sua utilização como taxa admissível demandará a aplicação de um coeficiente de segurança a critério do projetista da fundação.

É composto de dupla maçaneta (guidão), 4 hastes de 15" com 3 divisões, um anel dinamométrico capacidade 100 kgf, uma ponta cônica removível, três luvas de emenda, certificado de aferição, gráfico do anel. O relógio comparador do anel possui uma trava para possibilitar ao operador uma leitura mais precisa (após a leitura apertando-se o botão abaixo do mostrador o ponteiro voltará ao zero inicial); acondicionado em estojo.

ZERAÇÃO DO PENETRÔMETRO

Após a montagem certificar que as luvas, junções e relógio comparador estejam bem seguros, em seguida coloca-se o aparelho na posição de uso e "Zerar" o relógio comparador.

OPERAÇÃO

Com o terreno já limpo, o aparelho na posição vertical, relógio comparador zerado fazer um esforço de compressão a fim de que a ponteira cônica penetre toda no solo.

Fazer a leitura e ler o gráfico (curva de calibração do anel), à carga máxima de penetração. A resistência de penetração é obtida dividindo-se a carga de penetração pela AREA DA BASE DO CONE $0,28,4\text{mm} = 1,119 \text{ sq in} = 6,33 \text{ cm}^2$.

SEGURANÇA DO RELÓGIO

O relógio sendo um instrumento sensível e de alta precisão, deve ser protegido contra choques, quedas, umidade, manuseio irregular ou indelicado. Nunca deverá ser imergido em água, nem ser usado em tempo chuvoso e seu transporte deverá ser feito com proteção.

CALIBRAÇÃO E RECALIBRAÇÃO

O anel dinamométrico é fornecido pela SOLOTEST numerado e com certificado oficial de aferição. Em caso de perda fornecemos cópia, bastando citar esse número. Depois de constante uso deverá ser calibrado.

Nota: Em regiões de alta consistência ou compacidade, quando o cone não chega a penetrar inteiro e a carga estiver próximo do limite do anel dinamométrico a resistência poderá ser obtida multiplicando por um fator o quanto do cone penetrado.

Ex.: Se penetrar apenas meio cone, multiplicar por 4.

Se penetrar apenas um quarto do cone, multiplicar por 16.

Porém não se aconselha a leituras mais fracionadas por ser inevitável os erros.