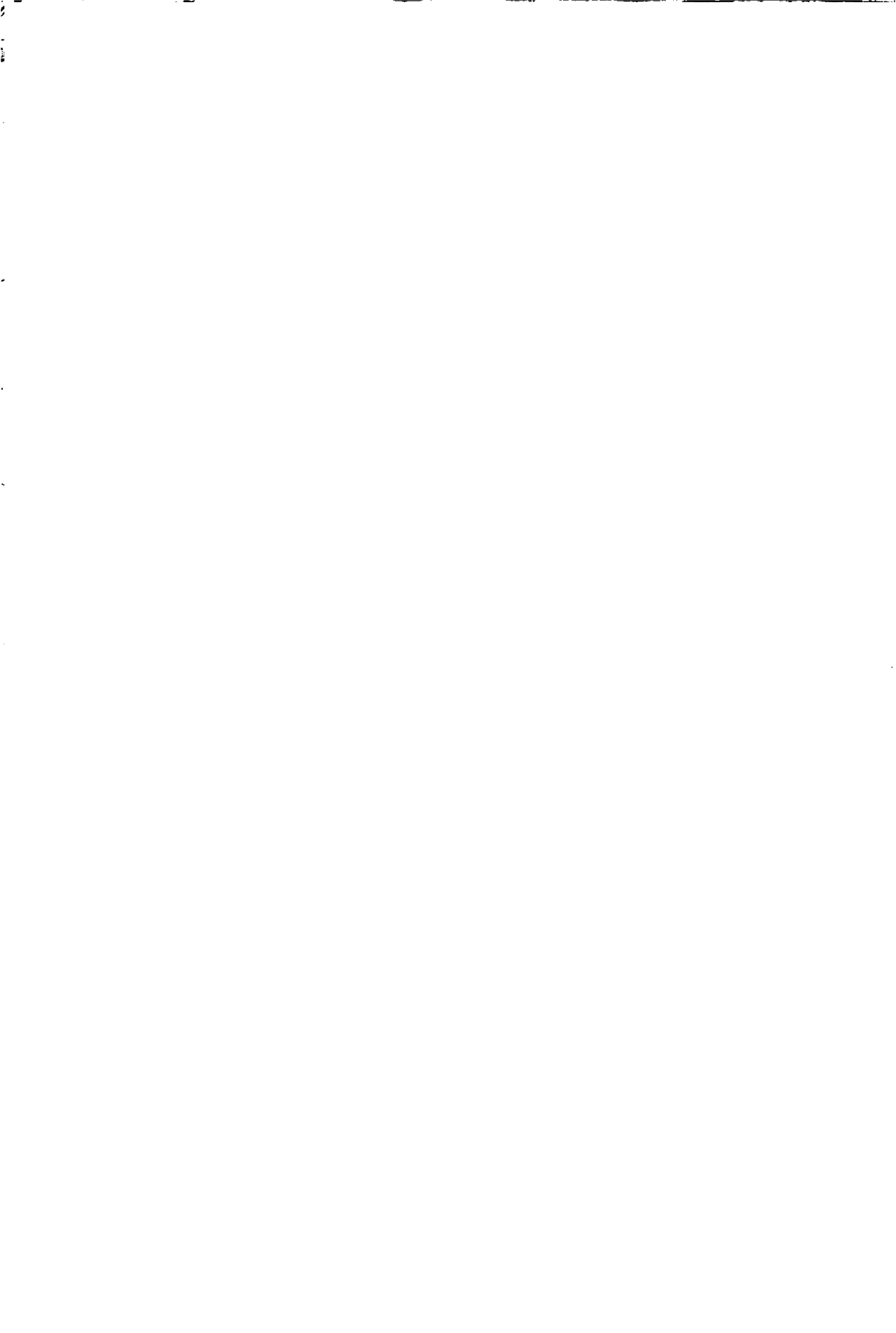




**EFEITO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM
PARÂMETROS FÍSICOS E NA
COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS DA MICRO-
REGIÃO DOS CAMPOS DA MANTIQUEIRA, MG.**

REGINALDO BARBOZA DA SILVA

1998



REGINALDO BARBOZA DA SILVA

**EFEITO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM PARÂMETROS FÍSICOS
E NA COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS DA MICRO-REGIÃO DOS
CAMPOS DA MANTIQUEIRA, MG.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, área de concentração em Manejo e Conservação do Solo e da Água, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador
Prof. Dr. José Maria de Lima

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
1998

Ficha Catalográfica preparada pela Seção de Classificação e catalogação da
Biblioteca Central da UFLA

Silva, Reginaldo Barboza da.

Efeito da adsorção de fósforo em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos da micro-região dos Campos da Mantiqueira, MG / Reginaldo Barboza da Silva. -- Lavras : UFLA, 1998.

109 p. : il.

Orientador: José Maria de Lima

Dissertação (Mestrado) - UFLA

Bibliografia

1. Solo-Compactação. 2. Fósforo-Adsorção. 3. Compressibilidade 4. Intemperismo. 5. Latossolo. 6. Cambissolo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título

CDD - 631. 42

631. 85

REGINALDO BARBOZA DA SILVA

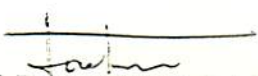
EFEITO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM PARÂMETROS FÍSICOS
E NA COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS DA MICRO-REGIÃO DOS
CAMPOS DA MANTIQUEIRA, MG.

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, área de concentração em Manejo e Conservação do Solo e da Água, para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA 11 de março de 1998

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior (Co-orientador) UFLA

Prof. Dr. Marx Leandro Naves Silva UFLA


Prof. Dr. José Maria de Lima
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
1998

Ofereço.

*Aos meus pais, Raimundo e Francisca (Patica),
e aos meus irmãos,
Pelo carinho, amor e compreensão, e por
incondicionalmente sempre me apoiarem*

*À Cida (in memoriam),
Pelo dedicação e exemplo de profissionalismo,*

Dedico.

*A minha noiva Alcivânia
pelo amor, carinho, e uma das mais nobres
virtudes, o companherismo.*

Ofereço.



AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha existência e a tudo que me foi concedido.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade que me foi criada.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

Aos professores Mauricio de Oliveira e Antônio Roberto Brigido de Moura, por terem me iniciado nos ensinamentos da Ciência do solo.

Ao professor José Maria de Lima, pela orientação e empreendimento.

Ao professor Moacir de Sousa Dias Junior, pela co-orientação e sugestões.

Aos professores Mozart Martins Ferreira e Nilton Curi, pelos seus conhecimentos aqui indispensáveis.

Aos técnicos Jairo Lima Júnior e Dulce Claret, pelo apoio, dedicação e paciência.

Ao Marcos Koiti Kondo, pelo esforço despendido no processamento e eletrônico, indispensável para conclusão deste trabalho.

Ao bolsista Jonas Jacob Chiaradia, pela paciência e critério na determinação dos limites de consistência e a Paula Angela U. Guedes, pela ajuda nas análises químicas.

Aos colegas de curso, Marco Carolino, Flávia de Alcântara, Leila Sobral, Eduardo D'alva e Wladimir Atnônio, pelo apoio nas horas de desespero.

**Ao amigos e companheiros José Romilson e Rogério Melloni pela sincera
amizade e solidariedade em todos os momentos.**

1984

1985

1986

BIOGRAFIA

REGINALDO BARBOZA DA SILVA, filho de Raimundo Barboza de Menezes e Francisca Ugolino de Menezes, nasceu em Felipe Guerra, Rio Grande do Norte, em 12 de fevereiro de 1967.

Sua formação básica deu-se pelo Sistema Pitágoras de Ensino no Estado do Pará, onde em 1987 concluiu o Curso de Análises Clínicas.

Em março 1990, ingressou no curso de Agronomia na Escola Superior de Agricultura de Mossoró, onde participou como bolsista do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica. Como atividades extracurriculares, foi coordenador do Centro Acadêmico da ESAM, membro do Conselho Técnico Administrativo e Coordenador Geral da Federação dos Estudantes de Agronomia do Brasil, Superintendência Regional VIII, graduando-se em 1995.

Em março de 1996, iniciou o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Lavras, concluindo-o em fevereiro de 1998.

SUMÁRIO

RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 Compactação em solos agrícolas	5
2.2 Ensaio de compactação.....	10
2.3 O papel da agregação.....	15
2.4 O papel da consistência.....	17
2.5 O papel da matéria orgânica.....	21
2.6 O papel do fósforo na dispersão de partículas	21
2.7 Relação do fósforo com os constituintes do solo.....	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Descrição e localização da área	25
3.2 Solos estudados	25
3.3 Amostragem	28
3.4 Tratamentos.....	29
3.5 Caracterização mineralógica	29
3.6 Caracterização química.....	31
3.7 Análises físicas	33
3.8 Compressibilidade dos solos.....	37

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Efeito da adsorção de P na microporosidade e na estabilidade de agregados.....	39
4.2 Efeito da adsorção de P nos limites de consistência.....	43
4.3 Efeito da adsorção de P nas curvas compressão.....	47
4.4 Relação entre o efeito da adsorção de P no índice de compressão e consistência do solo.....	63
4.5 Efeito da adsorção de p no modelo de compressibilidade baseado na história de tensão do solo.....	72
5 CONCLUSÕES.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ pH	Delta pH;
Å	Ângstrom;
a,b,c	Parâmetros de ajuste da equação;
ADA	Argila dispersa em água;
ADP	Argila dispersa com fósforo;
An	Anatásio;
AT	Argila total;
ATD	Análise térmica diferencial;
Cd ₁ P	Cambissolo Distrófico, na profundidade 0-3 cm com fósforo;
Cd ₁ SP	Cambissolo Distrófico, na profundidade 0-3 cm sem fósforo;
Cd ₂ P	Cambissolo Distrófico, na profundidade 27-30 cm com fósforo;
Cd ₂ SP	Cambissolo Distrófico na profundidade 27-30 cm sem fósforo;
cm	Centímetro;
CMAP	Capacidade máxima de adsorção de fósforo;
Ct	Caulinita;
CTC	Capacidade de troca catiônica;
CV	Coefficiente de variação;
d	Espaçamento basal;
DCB	Ditionito, citrato e bicarbonato de sódio;
DMG	Diâmetro médio geométrico;
DMP	Diâmetro médio de poros;

DMS	Diferença mínima significativa;
Ds	Densidade do solo;
Ds_i	Densidade do solo inicial;
Dw	Densidade da água;
Fe_d	Ferro ditionito;
Fe_o	Ferro oxalato;
Gb	Gibbsita;
Gt	Goethita;
Hm	Hematita;
IF	Índice de floculação;
IP	Índice de plasticidade;
K	Energia de adsorção;
Ki	Constante de intemperismo;
kPa	Quilopascal;
LC	Limite de contração;
LEd₁P	Latossolo Vermelho Escuro, na profundidade 0-3 cm com fósforo;
LEd₁SP	Latossolo Vermelho Escuro, na profundidade 0-3 cm sem fósforo;
LEd₂P	Latossolo Vermelho Escuro, na profundidade 27-30 cm com fósforo;
LEd₂SP	Latossolo Vermelho Escuro, na profundidade 27-30 cm sem fósforo;
LL	Limite de liquidez;
LP	Limite de plasticidade;
LU	Latossolo Variação Una;
m	Índice de compressão;

$m_{\text{máximo}}$	Índice de compressão máximo;
MPa	Megapascal;
Ms	Massa de sólidos;
n	Número de anéis;
P	Fósforo;
PB	Poros bloqueados;
PCZ	Ponto de carga zero;
PESN	Ponto de efeito salino nulo;
pH	Potencial hidrogeniônico;
P_{m}	Fósforo remanescente;
Qz	Quartzo;
RC	Retenção de cátions;
S	Grau de saturação;
Tb	Argila de atividade baixa;
u	Unidade gravimétrica;
U_{m}	Unidade de moldagem;
$u_{\text{ótima}}$	Unidade gravimétrica ótima;
V_{f}	Volume final do corpo de prova;
V_{o}	Volume inicial do corpo de prova;
V_{s}	Volume de sólidos;
VTP	Volume total de poros;
σ	Pressão aplicada;
σ_{c}	Pressão crítica;
σ_{i}	Pressão inicial;
σ_{p}	Pressão de preconsolidação.

RESUMO

SILVA, Reginaldo Barbosa da. Efeito da adsorção de fósforo em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos da micro-região dos Campos da Mantiqueira, MG. Lavras: UFLA, 1998. 109p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)*

Nos solos tropicais, onde predominam características oxídicas, é verificada alta retenção de fosfato, tornando inevitável a aplicação deste íon ao solo. Na literatura são encontrados estudos mostrando o efeito dispersivo deste elemento nos colóides do solo, em decorrência do desbalanço de cargas que a adsorção provoca. A dispersão pode afetar propriedades físicas como relação de tamanho de poros e causar, ainda, queda na estabilidade de agregados, predispondo o solo à maior compactação. Objetivando determinar a proporção deste efeito, amostras deformadas e indeformadas de um Cambissolo e um Latossolo Vermelho Escuro, da Região dos Campos da Mantiqueira (MG), foram coletadas nas camadas de 0-3 e 27 a 30 cm e submetidas aos tratamentos com e sem fósforo. As concentrações de P aplicadas às amostras variaram conforme a capacidade máxima de adsorção das mesmas. As amostras deformadas foram caracterizadas química e mineralogicamente, além de se determinar a relação de macro e microporos, estabilidade de agregados em água, textura e limites de consistência. Os resultados mostraram que a estabilidade de agregados foi diminuída de forma significativa naquelas amostras que receberam fósforo, com redução nos índices de floculação. Foi constatado também nestas amostras um incremento nos limites de consistência, causando redução na faixa de friabilidade e aumento na faixa de plasticidade dos solos, especialmente no Cambissolo. Nas amostras indeformadas foram avaliados os parâmetros de compressibilidade (pressões de preconsolidação e índice de compressão máximo) através de curvas de compressão que representam a densidade do solo plotada em função do Log da pressão aplicada à amostra. Os índices de compressão foram plotados em função dos teores de

* Comitê orientador: José Maria de Lima - UFLA (Orientador), Moacir de Souza Dias Junior - UFLA (Co-orientador) e Marx Leandro Naves Silva - UFLA

preconsolidação foram obtidas pelo modelo $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$. Os resultados mostraram um deslocamento das curvas de compressão para baixo e para a esquerda, implicando em diminuição das pressões de preconsolidação com aumento do nível de umidade e na presença de fósforo. Este deslocamento foi mais intenso no Latossolo Vermelho Escuro, em particular na camada de 0-3 cm, sendo portanto essa camada mais susceptível à compactação. A adsorção de fosfato afetou, portanto, a capacidade de suporte de carga e os limites de consistência do solo, com implicações nas práticas de manejo, uma vez que há um estreitamento na faixa de friabilidade (umidade ótima para o preparo do solo) e diminuição na resistência à compactação.

1977
MCMF

ABSTRACT

SILVA, Reginaldo Barboza da. Effect of phosphate adsorption on physical parameters and on compressibility of soils from Campos da Mantiqueira Region, MG, UFLA, 1988. 109p. (M.S. Dissertation - Soil science and Plant Nutrition)*

In tropical soils with oxidic features, there is high phosphate adsorption, making necessary to add this ion to soil in order to keep crop production. The literature have some studies showing the particle dispersion caused by phosphate adsorption, due to its effect on particle charge. Phosphate adsorption can affect physical properties such as pore size ratio besides decreasing aggregate stability, making the soil more susceptible to compaction. Aiming to measure the effect of phosphate adsorption on physical and mechanical parameters of soil, one Inceptisol and one Oxisol, from Campos da Mantiqueira Region, Minas Gerais State, Brazil, were sampled at 0-3 and 27-30 cm layers. Phosphate was applied to half of the samples, according to maximum phosphate sorption of each sample. Disturbed samples were chemical and mineralogically characterized, besides measuring macro and micropore ratio, aggregate stability, texture, and consistency parameters. The results showed that aggregate stability decreased on those samples treated with phosphate, with reduction of flocculation index. Consistency limits also increased, reducing the friability and increasing plasticity range, mainly in Inceptisol samples. Undisturbed samples were measured for compressibility parameters (preconsolidation pressures and maximum compression index) using compression curves (soil density plotted against Log of applied pressure). Compression index was plotted against water content for each sample, and the curve adjusted to the model $m = aU^2 + bU + c$. Preconsolidation pressures were evaluated using the model $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$. The results showed that the compression curves shifted down and to the left position, causing preconsolidation pressures to decrease as water content increased and phosphate was present in the samples. This shifting was more intense for the Oxisol samples, mainly at the surface layer, which means that

*Guidance Commetnee: Prof. José M. Lima - UFLA (Major Professor); Moacir S. Dias Junior - UFLA; and Marx Leandro N. Silva - UFLA.

this layer is more susceptible to compaction. Phosphate adsorption decreased the load support capacity and consistency limits of soils, rising concerns about management practices, since it decreases the friability range (optimum water content for soil management). It also decreased soil resistance to compaction.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura mundial, por força da demanda crescente de alimentos, foi obrigada a se remodelar. Assim, no lugar de um modelo de agricultura rudimentar e de baixa tecnologia, surgia uma agricultura de altos insumos e de precisão, que contempla a fertilização e a motomecanização pesada. Neste contexto, o Brasil, movido pela "Revolução Verde" e pelo "Milagre Brasileiro", abriu suas fronteiras agrícolas aos avanços da agricultura moderna, aumentando, consideravelmente suas áreas cultivadas. Como consequência, também grandes foram os impactos ambientais: áreas devastadas, salinizadas, compactadas, erodidas e, portanto, fora do processo produtivo.

É inegável a contribuição da fertilização e da mecanização ao aumento da produção agrícola. Contudo, podem surgir efeitos negativos quando estas são praticadas de forma inadequada ou irresponsável. Sabe-se que o solo agrícola como um fator de produção, dentro da ótica de uma agricultura sustentável, exige a manutenção e garantia de sua perenidade. Portanto, as práticas de manejo que atualmente dependem de forma significativa da mecanização agrícola, devem considerar as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do pedocossistema.

Nos últimos anos, tem sido observado um expressivo aumento do emprego da motomecanização na agricultura, com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de máquinas e equipamentos destinados às várias fases da produção agrícola. Isto tem comprometido o equilíbrio de ambientes agrícolas

pelo depauperamento e compactação do solo, devido ao tráfego de equipamentos durante a fase de desenvolvimento das culturas ou na colheita e no transporte ¹.

Dentre os prejuízos causados pela corrida da motomecanização, a literatura, de uma forma ampla, aponta a compactação do solo como a causa preponderante e geralmente limitante na produtividade agrícola. Muitos pesquisadores investigaram a ação compactadora das rodas das máquinas agrícolas e dos equipamentos de preparo e cultivo do solo, relacionando tal ação com alteração das propriedades do solo que levam a situações desfavoráveis ao desenvolvimento de plantas cultivadas². Na literatura também constata-se que, muitos têm sido os sistemas de manejo e técnicas desenvolvidas, visando alívio, ou até, uma estabilização do grau de compactação. Contudo, a maioria das pesquisas nesta área está voltada para identificar e avaliar principalmente os efeitos da compactação. Poucos são os trabalhos que objetivam determinar ou quantificar este fenômeno do ponto de vista de suporte de carga³, isto é, quanto de carga um solo estaria apto a receber sem sofrer compactação adicional.

Outro problema nos estudos da compactação do solo é a generalização e extrapolação de respostas e modelos para pedocossistemas que geralmente fogem da realidade das condições do estudo inicial. Um número considerável de pesquisas já foi desenvolvido para quantificar as alterações nas propriedades físicas do solo causadas pela motomecanização³, entretanto, o dilema consiste em definir a umidade abaixo da qual o solo estaria adequado para ser trafegado, sem

¹ Ribeiro (1987) e Maziero (1993).

² Ballesteros (1992).

³ Dias Junior (1994)

causar a compactação adicional. Assim, este autor desenvolveu um modelo que prediz a pressão máxima que o solo suporta, em função da umidade, sem causar compactação adicional.

Percebe-se de certa forma, um avanço no uso das informações das propriedades físicas no processo de compactação do solo. Entretanto, existe ainda uma carência de estudos que busquem uma maior compreensão do efeito das propriedades químicas neste contexto. Em solos oxidícos, a adsorção do íon fosfato, determinando em parte, a dinâmica do balanço de cargas, afeta as propriedades físicas do solo, o que leva a inferir que a fertilização fosfatada, feita de maneira inadequada, pode tornar o solo mais susceptível à ação compactadora das máquinas agrícolas.

Trabalhos envolvendo a retenção do íon fosfato em solos altamente intemperizados não são recentes. Tentativas para relacionar adsorção com a mineralogia do solo, mostrando que óxidos de Fe e Al participam ativamente do fenômeno de retenção de fósforo, já foram observadas em diversos trabalhos⁴. A magnitude desta retenção depende da participação da matéria orgânica, tipos de argila e grau de cristalização, teores e tipos de óxidos e hidróxidos de Fe e Al.

A maior parte das reações, envolvendo óxidos e hidróxidos de Fe e Al com geração de cargas, são reações dependentes de pH. O domínio de um tipo de carga na superfície das partículas, seja ela positiva ou negativa, produz forças repulsivas entre partículas, aumentando a dispersão e diminuindo a estabilidade dos agregados. Este fenômeno é mais intenso em solos com balanço de carga positivo, pelo fato da redução do PCZ⁵. Uma vez que, adsorção de fósforo em solos oxidícos com carga positiva variável reduz o PCZ, alterando o balanço de

⁴ Rezende (1976). Bahia Filho (1982) e Curi (1983)

⁵ Hingston, Posner e Quirk (1974). Sawhney (1974) e Sposito (1989a)

cargas e, portanto, afetando a floculação e dispersão de partículas, esta adsorção pode também suscetibilizar o solo à compactação. Com isso, além da umidade, textura, estrutura, história de tensão e densidade do solo, como proposto pela literatura⁶, a adsorção de P pode influenciar a curva de compressão do solo.

Desta forma, os objetivos deste estudo, foram avaliar o efeito da adsorção de P em parâmetros físicos e nas curvas de compressão, bem como validar os modelos de compressibilidade⁶ para o Cambissolo distrófico e o Latossolo Vermelho Escuro Distrófico, da micro-região dos Campos da Mantiqueira, MG.

⁶ Dias Junior (1994)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Compactação em solos agrícolas

O solo como um fator de produção, dentro da ótica de uma agricultura sustentável, exige a manutenção e garantia de perenidade. Portanto, as práticas de manejo que atualmente dependem de forma significativa da mecanização agrícola, devem atender não somente as necessidades fitotécnicas, mas considerar as propriedades físicas, químicas e mineralógicas de um pedocossistema agrícola. Entretanto, fazendo uma análise dos estudos correlacionados a sistemas de preparo do solo e às crescentes práticas corretivas, percebe-se que esta não é a tônica da discussão.

O que tem sido observado nos últimos anos, em decorrência da necessidade de maior produção, é um expressivo aumento do emprego da motomecanização na agricultura e o aperfeiçoamento de máquinas e equipamentos destinados às várias fases da produção agrícola. É reconhecida a capacidade desta tecnologia em criar uma condição de estrutura do solo favorável ao crescimento das plantas, mesmo sob condições edáficas e climáticas desfavoráveis. No entanto, esta vantagem inicial tem sido comprometida pelo depauperamento e compactação do solo devido ao tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas (Ribeiro, 1987 e Maziero, 1993), principalmente em condições de umidade inadequadas.

A literatura, de forma ampla, aponta a compactação do solo como um fator limitante à maior produtividade agrícola. Alguns pesquisadores (Ribeiro,

1987; Ballester, 1992 e Maziero, 1993) investigam a compactação do ponto de vista das máquinas agrícolas e de equipamentos de preparo e cultivo do solo, relacionando tal ação com a alteração das propriedades do solo. Já outros (Dias Junior, 1994 e Dias Junior e Pierce, 1995), detêm-se em modelar estas alterações, tentando compreender o comportamento das propriedades do solo, dentro do processo de compactação. Desta forma, percebe-se que os trabalhos sobre o assunto em questão é predominantemente do ponto de vista mecânico. Todavia, com a explosão da agricultura de altos insumos, é inevitável o uso de corretivos químicos no solo. E, no caso de solos tropicais, de características oxidicas, onde é verificado uma alta retenção de fósforo, torna-se cada vez mais evidente a utilização deste elemento. O seu benefício para as culturas é inegável. Porém, existem na literatura mostras do efeito dispersivo deste elemento nos colóides do solo (Hingston, Posner e Quirk, 1974; Sawhney, 1974); e Sposito 1989a), podendo alterar as propriedades físicas e comprometer o estado de agregação do solo. Neste aspecto, faltam informações que enfoquem a interdependência das propriedades físicas do solo e reações químicas de superfície de partículas, dentro do processo de compactação do solo.

Fatores e causas determinantes do processo de compactação

A resistência de um solo à compactação é determinada por uma força mecânica (Bowen, 1981). Segundo este autor, esta força consiste de dois componentes: força coesiva e força friccional. Os valores destes dois componentes dependem do teor de água, da distribuição do tamanho de partículas, tamanho do agregado, composição e concentração da solução do solo, matéria orgânica, tipo de mineral e a história de tensão do solo. Estes fatores, nas mais variadas combinações em um determinado solo e intervalo de tempo, fornecem condições para se medir com precisão os valores dessa força mecânica.

Assim, um solo sujeito a uma pressão pode sofrer variação de volume, a qual, segundo Bowen (1981), pode ser atribuída a: i) compressão das partículas sólidas; ii) redução dos teores de líquidos e gases dentro dos espaços porosos; iii) mudança do conteúdo de líquido ou gás dentro dos espaços porosos e iv) rearranjo das partículas sólidas.

De acordo com Bowen (1981), a compactação do solo pode então ser definida em termos de densidade do solo, porosidade e índice de vazios. Desta forma, um solo sob forças compressivas tem distribuição dos poros por tamanho alterada e a porosidade total é diminuída, promovendo mudanças no movimento e teor de água, ar, calor e nutrientes do solo.

Para Cohron (1971), a diminuição do volume de uma determinada massa de solo ocasionada pelo rearranjo das partículas, é provocada por forças internas e externas. As forças internas são todas aquelas originadas dentro da massa do solo, tais como: congelamento e degelo, umedecimento e secamento. As externas, são aquelas que resultam da ação de máquinas, equipamentos agrícolas e pisoteio do solo. Chancellor (1976), concordando com Cohron (1971), atribuiu também como causas da redução deste volume, a consolidação natural durante o processo de formação do solo, o pisoteio de animais e humanos, a contração do solo quando seco e a sensibilidade a pressões e deformações causadas pela ação de equipamentos agrícolas.

O teor de matéria orgânica, teor de argila (Moraes, 1988) e teor de areia (Pacheco e Dias Junior, 1990) também influenciam no processo de compactação. Conforme Moraes (1988), maiores teores de matéria orgânica resultam em densidades do solo mais baixas e teores ótimos de água mais elevado para o preparo do solo. Este autor observou ainda que uma deterioração no nível de matéria orgânica dos solos, assim como elevados teores de argila, podem influenciar a resposta à aplicação de uma pressão. Desta forma, frações

granulométricas como argila e areia, bem como a participação da matéria orgânica, podem influenciar a estrutura do solo, e por conseguinte no processo de compactação.

O tipo de mineral de argila também exerce influências sobre a suscetibilidade do solo à compactação. Solos argilosos, mesmo tendo granulometria semelhante, podem apresentar diferenças nas propriedades coloidais, em função do tipo de mineral de argila. Segundo Achá (1976), uma microestrutura laminar com um arranjo orientado, que permite uma aproximação mais uniforme das unidades estruturais com a elevação do teor de água, resulta em maior grau de compactação destes solos. Este fato, não ocorre em solos altamente intemperizados.

Além desses fatores, Dias Júnior (1996) acrescenta que, para uma mesma condição, o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo, é o teor água. Assim, quando os solos estão mais secos, a sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para sustentar pressões mais elevadas, sendo a compactação não significativa.

Efeitos da compactação

Os efeitos de compactação do solo podem ser observados tanto na planta como no solo. De acordo com Ferreira (1988), na planta verifica-se a baixa emergência e variação no tamanho, folhas amareladas, sistema radicular pouco profundo e raízes mal formadas. No solo, é constatado a presença de crostas, aparecimento de trincas nos sulcos de rodagem do trator, zonas endurecidas abaixo da superfície do solo, empocamento de água e a necessidade de maior potência das máquinas de cultivo.

Ainda, com referência aos efeitos da compactação do solo, Kooistra e Tovey (1994) registraram mudanças na microestrutura. Conforme estes autores,

durante a compactação, seja pelas práticas de cultivos ou tráfegos de máquinas, os poros têm a sua forma alterada e o tamanho reduzido, podendo ser destruídos ou desaparecerem completamente. Geralmente, os macroporos são reduzidos e os microporos diminuem a sua intercomunicação.

Horton, Ankeny e Allmaras (1994), estudando o efeito da compactação nas propriedades hidráulicas do solo, constataram que a retenção e o transporte de água no solo são também alterados com as mudanças na porosidade.

O efeito da compactação nas propriedades de aeração do solo foi estudado por Stepniewski, Glinski e Ball (1994). Segundo estes autores, a aeração é um processo dinâmico no solo, o qual permite a troca de gases entre a atmosfera e o ar do solo, permitindo a respiração das raízes das plantas e dos microrganismos. Assim, uma vez comprometida a porosidade do solo, estará comprometida também a produção das culturas.

Brussaard e Faassen (1994), estudando o efeito da compactação na biota e processos biológicos do solo, ressaltam que para uma ótima produção é necessário um manejo integrado entre as propriedades físico-químicas e processos biológicos. De acordo com estes autores, a boa estrutura de um solo é um pré-requisito básico para uma produção satisfatória e funcionamento adequado dos organismos no solo. Dessa forma, a estrutura do solo fornece às raízes e organismos do solo um espaço poroso "habitável" e controla muitos processos, como: transporte de água, oxigênio e nutrientes. Em retribuição, os organismos do solo, podem contribuir para uma melhoria da estrutura através da formação de agregados e formação de bioporos. No entanto, o cultivo intensivo do solo e o tráfego de maquinário pesado podem danificar os organismos do solo e seus habitats, reduzindo assim o seu papel positivo.

O efeito da compactação nos parâmetros de força mecânica do solo foram abordados por Guerif (1994). Conforme o autor, para medir diferentes efeitos na

estrutura e organização do solo, constituição (mineral ou orgânica) e teores de água, é necessário uma análise na origem desta força, para que se possa determinar as alterações produzidas. A intensidade da força mecânica do solo varia amplamente dentro do perfil do solo, sua distribuição depende dos elementos estruturais, dos agregados e das zonas fragmentadas ou compactadas. De maneira geral, a compactação pode implicar em aumento da Ds e capacidade de suporte carga, diminuindo o volume total de poros.

2.2 Ensaio de compactação

Ensaio de Próctor normal

O princípio deste ensaio consiste em compactar três ou cinco camadas de solo em um cilindro de volume conhecido (1.000 ou 2.300 cm³). Para isso, se faz uso de um soquete também de peso conhecido (2,5 ou 4,5 kgf), variando o número de golpes (12, 13, 25, 28, 36, e 60), obtendo assim diferentes níveis de energia de compactação (Dias Junior, 1996).

Este ensaio permite obter a curva de compactação do solo a partir da relação entre a densidade do solo, plotada no eixo dos Y e a umidade plotada no eixo dos X. No ponto de máximo desta curva tem-se a densidade do solo máxima correspondente a uma umidade ótima de compactação, para uma determinada energia da mesma.

Até atingir o ponto máximo da curva, com o incremento da umidade, a película de água adsorvida torna-se mais espessa, provocando a lubrificação das partículas que deslizam e se orientam formando uma massa mais acirrada. Entretanto, após atingir o ponto máximo da curva, a densidade do solo diminui já que a água, em altos teores, entra nos espaços porosos levando o solo a comportar-se como um fluido (Hillel, 1982).

Para Dias Junior (1996), apesar do ensaio de Proctor ser relativamente simples em laboratório, este é limitado para o estudo da compactação de solos agrícolas pois a destruição da estrutura para a realização do ensaio, apaga a história de tensão do solo. Outro agravante é relatado por Raghavan e Mckyes (1983), onde constataram que, para níveis de umidade acima da umidade ótima de compactação, as rodas do trator patinam e causam o cisalhamento do solo, contribuindo significativamente para agravar a compactação do solo.

Ensaio de compressibilidade

O ensaio de compressibilidade, conforme Dias Junior (1996), consiste na aplicação de pressões sucessivas e contínuas, previamente estabelecidas a uma amostra indeformada de material de solo na condição parcialmente saturada. Este ensaio permite a obtenção da curva de compressão do solo que representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo, como mostrado na figura 1 (Dias Junior, 1994).

A partir da curva de compressão determina-se a pressão de preconsolidação (σ_p) como uma alternativa para medir a capacidade de suporte de carga de solos parcialmente saturados (Dias Junior, 1994; Dias Junior e Pierce, 1996; Dias Junior, 1997), o que pode ser feito pelo método gráfico de Casagrande (1936), ou pelo método proposto por Dias Junior e Pierce (1995).

O método gráfico de Casagrande é baseado na escolha do ponto de raio mínimo ou de máxima curvatura da curva de compressão do solo. Entretanto, alguns autores têm verificado que a medida que aumentam as perturbações na amostra indeformada (Holtz e Kovacs, 1981) ou quando estas são submetidas aos ensaios de compressibilidade com a de umidade (Dias Junior e Pierce, 1995), torna-se difícil a escolha do ponto de máxima curvatura pois as curvas de

compressão do solo, ficam praticamente lineares. Por isso, segundo Dias Junior (1996), este método apresenta grande subjetividade.

O método proposto por Dias Junior e Pierce (1995) baseia-se numa planilha eletrônica de fluxo livre para estimar a pressão de preconsolidação construída a partir de softwares Quatro Pro (versão 4.0 ou superior, Borland International, Inc., Scotts Valley, U.S.A.) ou Excel (versão 5.0 ou superior, Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, Washington, U.S.A.). Segundo Dias Junior (1996), este método, além de ser confiável, é repetitivo, o que possibilita a sua utilização por outros profissionais da área, além disso, reduz significativamente a probabilidade de erro durante a sua determinação.

A partir da curva de compressão (Figura 1), determina-se o índice de compressão (m). Este índice é estimado como sendo a inclinação da reta de compressão virgem (Bradford e Gupta, 1986). Assim, quanto maior o seu valor, maior será a inclinação da reta de compressão virgem e, por sua vez, maior a suscetibilidade do solo à compactação.

De acordo com a literatura, a curva de compressão, tem sido usada como base para modelar a suscetibilidade do solo à compactação (Larson e Gupta, 1980; Larson, Gupta e Useche, 1980 e Dias Junior, 1994).

Quando os ensaios são feitos com solos que não sofreram nenhuma pressão prévia, a relação entre a pressão aplicada e a densidade do solo será linear, e qualquer pressão aplicada resultará em deformações não recuperáveis (Dias Junior e Pierce, 1996). Entretanto, quando estes são realizados em solos que já tenham uma história de tensão, as deformações resultantes poderão ser recuperáveis e não recuperáveis (Stone e Larson, 1980; Gupta et al., 1989; Lebert e Horn, 1991 e Dias Junior Pierce, 1996).

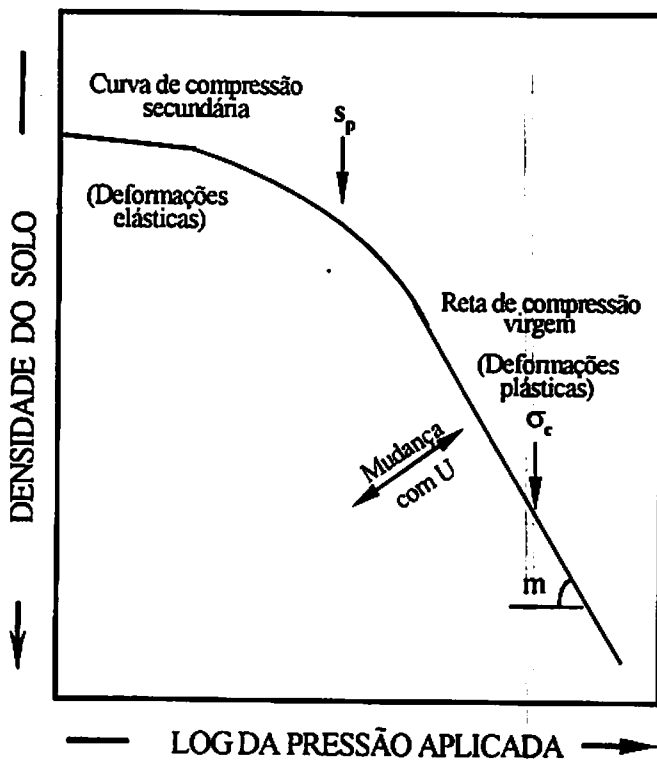


FIGURA 1. Curva de compressão do solo⁷ mostrando a curva de compressão secundária, reta de compressão virgem com suas regiões de deformações elásticas e plásticas, respectivamente, e a posição da pressão de pré-consolidação (σ_p), pressão crítica (σ_c) e o índice de compressão (m).

É na região da curva de compressão secundária, conforme Dias Junior e Pierce (1996), que o solo deve ser cultivado ou trafegado para que não ocorra compactação adicional pois, segundo estes autores, é este o componente da curva

⁷ Fonte: Dias Junior (1994)

de compressão que reflete a história de tensão do solo e que estava sendo desconsiderada na modelagem da compactação do solo.

Assim, Dias Junior e Pierce (1995) propuseram a pressão de preconsolidação como sendo a maior pressão que o solo já suportou no passado. Portanto, a pressão de preconsolidação é o limite máximo de pressão que, aplicada ao solo, não provoque compactação adicional (Dias Junior, 1994).

O estudo da modelagem do processo de compactação do solo no Brasil, fazendo uso da curva de compressão em sistemas agrícolas, é recente, o que é a causa da carência de informações nesta área. Com exceção de Dias Junior (1994) e pesquisas em andamento coordenadas pelo autor, que buscam validar modelos de compressibilidade para as condições de clima tropical, têm-se registros de apenas dois outros trabalhos. Macedo (1993), que determinou a compressibilidade de Podzólico Vermelho Escuro degradado e recuperado em vários níveis de umidade. E Carpendo (1994), que estudou a compressibilidade de um Podzólico Vermelho Escuro, Podzólico Vermelho-Amarelo e um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de manejo. O primeiro, utilizou o ensaio de compressão confinada, e avaliou a curva de compressão do solo e a resistência à penetração, verificando não haver diferença entre as condições estudadas. O segundo, determinou o grau de compactação inicial, índice de compressão e a pressão crítica, concluindo que os graus de compactação diferenciaram-se apenas no Podzólico Vermelho Escuro.

Apesar disso, nos últimos anos, houve um avanço no estudo do processo de compactação através da modelagem, utilizando curva de compressão do solo, levando em conta a pressão de preconsolidação e a variação da umidade dentro dos sistemas agrícolas. Entretanto, aspectos químicos que estão relacionados a balanço de cargas, podendo influenciar nas propriedades físicas do solo e por

consequente, afetar o processo de compactação, não são contemplados na literatura.

2.3 O papel da agregação

Aspectos físicos, químicos e mineralógicos

A agregação do solo é uma propriedade dinâmica que pode ser alterada com o tempo, em função da ação de fatores pedogenéticos e do uso de práticas de manejo. Para Kiehl (1979), no processo de agregação do solo, é necessário que duas condições fundamentais sejam consideradas. A primeira, é que haja uma força qualquer que promova a aproximação das partículas, e a segunda é que, após este contato haja um agente cimentante capaz de consolidar esta união. Carvalho (1991), vai mais além, dizendo que a agregação do solo, manifesta-se, segundo o arranjo dos constituintes minerais, dependendo de tamanho das partículas, da matéria orgânica e do pedoclima. Entretanto, ressalta que para esta agregação ser estável, faz-se necessário que as condições químicas, físicas e mineralógicas do solo, sejam favoráveis.

A agregação, uma vez instável, favorece um arranjo mais acirrado das partículas, favorecendo o fenômeno do adensamento⁸ e principalmente a compactação, quando da decorrência da ação de forças externas. Mattos (1978) observou que a distribuição de frequência equilibrada das classes de tamanho das partículas primárias podem conduzir a uma organização mais acirrada. Isto é possível quando as partículas menores ocupam os espaços vazios entre as partículas maiores. Daí, pode-se concluir que a compactação é mais frequente em solos constituídos de partículas de diferentes tamanhos, sendo, portanto, a distribuição das frações granulométricas determinantes neste fenômeno. Assim,

⁸ Diminuição do volume de poros do solo, devido aos fatores pedogenéticos.

um solo jovem no qual predominem frações de areia fina e silte pode ser mais suscetível ao fenômeno do adensamento, comparado a um solo com uma distribuição granulométrica mais homogênea, como por exemplo, um solo em um estado mais avançado de intemperismo.

A literatura tem mostrado uma alta correlação entre o teor de matéria orgânica e a agregação em solos temperados. Em solos de clima tropical, o conjunto de agentes agregantes inclui argilas óxicas e matéria orgânica em diferentes estágios de decomposição. Carvalho (1991) ressalta que o único grupo de solos no qual a correlação entre o teor de matéria orgânica e agregação é baixa é o dos latossolos. Neste caso, óxidos de ferro e alumínio são os principais responsáveis pela formação de agregados estáveis. O autor observou também que a correlação entre o teor de carbono orgânico e a agregação nestes solos é maior nas classes de agregados superiores a 0,1mm .

As propriedades físicas dos latossolos são marcadamente influenciadas pela composição mineralógica, cabendo à caulinita e gibbsita a maior influência sobre estas propriedades e sobre o desenvolvimento da estrutura (Resende, 1982). Estudos mineralógicos e micromorfológicos feitos por Ferreira (1988) permitiram a proposição de modelos de estruturação, baseados em duas situações: 1) Latosolo Gibbsítico: “A distribuição dos grãos de quartzo em relação ao plasma apresenta o desenvolvimento de microestrutura com predomínio de poros de empacotamento composto”. Como consequência, estes solos apresentam uma estrutura granular com alta estabilidade em água, baixa densidade do solo e alta permeabilidade; 2) Latosolo Caulinitico: “A distribuição dos grãos de quartzo em relação ao plasma é eminentemente porfirínica, isto é, os grãos são envoltos num plasma denso, contínuo, com pouca tendência ao desenvolvimento de microestrutura”. Como consequência, esses solos apresentam estrutura em blocos, baixa estabilidade em água, elevada densidade do solo e baixa

permeabilidade, com tendência a erosão laminar. Ainda segundo este autor, a matéria orgânica atua discretamente como agente cimentante em razão de seu baixo teor. Mattos (1978) e Cavalho (1991) também encontraram relação direta entre o teor de óxidos de ferro, resistência à agregação e o adensamento em latossolos amarelos, em platôs litorâneos ao norte do Espírito Santo. Estes solos, têm predominância da caulinita, praticamente ausência da gibbsita e o teor de matéria orgânica é baixo.

O fenômeno da floculação confere maior estabilidade aos agregados do solo. Este fenômeno dá-se a partir da união das bordas com cargas positivas dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al e as faces com cargas negativas das argilas, com a produção de agregados muito mais estáveis do que aqueles formados a partir da simples aproximação de partícula pela intervenção de sais, Carvalho (1991). Estes últimos, geram flocos com durabilidade associada à presença do agente floculante e dependente diretamente do teor de água no solo. Em sistemas constituídos de óxidos de ferro e alumínio, a presença de cargas positivas reforça o efeito floculante e dá maior estabilidade. Entretanto, existem controvérsias sobre o papel dos óxidos de ferro na formação de agregados. Segundo Schwertmann e Kampf (1985), em Latossolos, os óxidos de ferro (goethita e hematita) tendem a formar microagregados entre eles, ao invés de interagirem com a caulinita. Contudo, Santos (1989) observou que microagregados de óxidos de ferro, associados com matéria orgânica e caulinita formam macroagregados.

2.4 O papel da consistência

A consistência do solo, é definida como as manifestações das forças físicas de coesão e adesão atuando sobre a massa de solo (Baver, 1972). Essas manifestações, segundo Larson e Gupta (1980), influem em propriedades como

dureza, friabilidade, plasticidade e pegajosidade, podendo indicar a tendência do solo aderir à outros corpos, com por exemplo, à máquinas e equipamentos agrícolas. Assim, o conhecimento dos limites de consistência do solo poderá ser de grande valia na tomada de decisões como a condição ideal do solo para operações agrícolas.

Conforme Dias Junior (1996), a mudança na consistência do solo pode ser esquematizada (Figura 2) e exemplificada da seguinte forma: “Se a um solo extremamente seco, portanto, não modável plasticamente, adicionarmos progressivamente pequenas quantidades de água, este se tornará cada vez mais sujeito à deformação. A partir de um determinado teor de umidade, o solo se tornará friável. Continuando a adicionar água, o mesmo solo atingirá uma umidade, a partir da qual, o mesmo será plástico, permitindo ser moldado. Continuando a adicionar água, o mesmo solo vai se tornando cada vez mais fluido até atingir um teor de umidade, além do qual, passará a atuar como líquido viscoso (Figura 2). A passagem de um estado de consistência para outro é gradual. O teor de umidade que separa o estado líquido do estado plástico, denomina-se limite de liquidez (LL), sendo os limites de plasticidade (LP), e de contração (LC) separadores dos estados plástico, semi-sólido e sólido, respectivamente.”

Em função desses teores de umidade nos referidos limites de consistência, pode-se calcular o índice de plasticidade do solo, que é dado pela diferença entre o limite de liquidez e limite de plasticidade (Caputo, 1977 e Dias Júnior, 1996).

De acordo com Oliveira (1979), os valores do IP compreendidos entre 1 e 7 %, são considerados fracamente plásticos; solos com IP variando de 7 a 15 %, são considerados moderadamente plásticos e quando os valores de IP ultrapassam a 15 % os solos, são considerados altamente plásticos. O índice de plasticidade é

bastante variável no solo e depende das suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

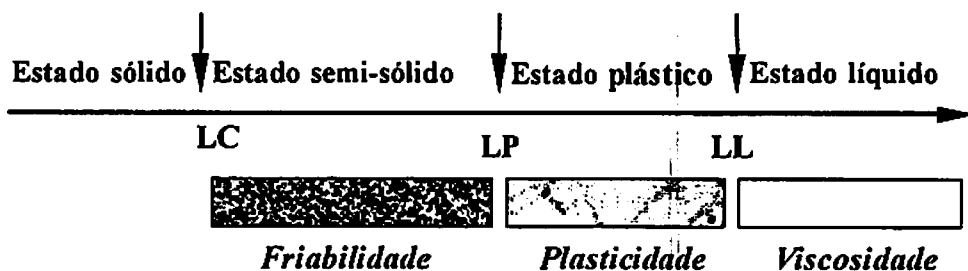


FIGURA 2. Desenho esquemático, mostrando os estados e limites de consistência do solo. (Fonte: Dias Júnior, 1996).

Dependendo do teor de argila do solo, bem como o tipo, haverá diferentes respostas no que se refere aos limites de liquidez e plasticidade. O tipo de cátion adsorvido no complexo de troca, a mineralogia e a capacidade de troca de cátions podem influenciar no comportamento destas propriedades. Segundo Ahmed, Swindale e Elswaify (1969) e Gill e Reaves (1957), os cátions de carga 2^+ (Ca e Mg), quando comparados com os de carga 1^+ (K e Na) atuam indiferentemente no comportamento dos limites de liquidez e plasticidade do solo, variando apenas com a mineralogia do solo. Também segundo estes autores, solos cauliniticos e sexquióxidos possuem menores limites de plasticidade, quando comparados com os montmoriloníticos e alofânicos. Segundo estes autores, isto se deve ao fato das argilas do tipo 2:1 necessitarem maior teor de água para atingir o estado de plasticidade, do que as argilas 1:1 e misturas caulinitas-óxidos de ferro. Dentro porém, de um mesmo sistema mineralógico segundo os referidos autores, quanto maior for o teor de argila, maior será o índice de plasticidade do solo. O fato

dessa relação não ser, em muitos casos, verdadeira para solos tropicais, pode estar ligado ao elevado índice de agregação desses solos. Assim, aqueles fatores que afetam à agregação, afetam também estes índices.

O conhecimento dos limites de consistência e as implicações práticas destes, são importantes para os solos agrícolas. Os mesmos indicam a faixa ótima de umidade, em que os solos podem ser trabalhados, sem que suas estruturas sejam deformadas a ponto de prejudicar o desenvolvimento vegetal. Dessa forma o conhecimento do limite de plasticidade, assume maior importância, uma vez que, ele representa a umidade acima da qual o solo pode ser seriamente comprometido. Kondo (1998) sugere que a umidade referente a este limite, pode ser usada a nível de campo como uma inferência do teor de água máximo, no qual as operações motomecanizadas podem ser realizadas. Assim, por segurança, estas operações só devem ser realizadas em níveis de umidades menores que o LP.

O limite de contração, conforme Caputo (1977), é a umidade a partir da qual, o solo não mais se contrai, embora continue perdendo peso (Figura 2). São poucas as informações a nível de trabalhos e dados publicados sobre este limite de consistência. Pacheco e Dias Júnior (1990), observaram que o limite de contração, está relacionado à textura, verificando que a areia reduz o fenômeno de contração e a quantidade de trincas no corpo de prova. No que se refere a metodologia, recentemente, Dias Junior e Miranda (1998), buscando uma alternativa à metodologia atual que emprega o mercúrio metálico, propuseram uma metodologia modificada para determinação deste limite, na qual, a parafina, surge como alternativa na substituição do mercúrio.

2.5 O papel da matéria orgânica

Nos solos tropicais, a matéria orgânica se concentra na camada superficial (0-10 cm), sendo responsável pela capacidade de retenção de nutrientes e acumulação de água, em razão de sua elevada atividade, no estado coloidal. Além disso, esta propicia a agregação de partículas, formando uma estrutura granular com grande quantidade de grumos, importante fator anti-erosão, e condiciona uma maior porosidade em condições adequadas para o desenvolvimento dos microrganismos, ativando o processo de reciclagem (Silva, 1996). A matéria orgânica atua na agregação do solo como um agente cimentante. Devido à sua decomposição pelos microrganismos, a mesma deve ser repostada continuamente para que se mantenha a estabilidade dos agregados ao longo do tempo (Hillel, 1982). Entretanto, devido aos sistemas de preparo do solo, a proteção física da matéria orgânica deixa de existir em função da quebra dos agregados, expondo-a ao ataque de microrganismos e causando como consequência a redução do seu teor no solo (Tisdall e Oades, 1982). Com a sua diminuição, é inevitável a alteração em várias propriedades do tais como: estrutura, densidade, taxa de infiltração, teor de água disponível e estabilidade de agregados (Dedecek, 1992).

Assim, sendo as propriedades do solo altamente influenciadas pelo pela matéria orgânica, é inegável a participação desta como atenuante no processo de compactação dos solos.

2.6 O Papel do fósforo na dispersão de partículas

Conforme Gillman (1974) e Sumner (1992), a maior parte das reações envolvendo óxidos de ferro e alumínio são pH-dependentes, e a presença de carga na superfície positiva ou negativa, produz forças repulsivas entre partículas de

cargas iguais, e conseqüentemente, reduz a estabilidade de agregados e aumenta a dispersão de argila. Para Hingston et al. (1972) e Van Raij (1973b) a superfície de cargas é afetada não somente pela mineralogia, matéria orgânica e pH, mas também pela fixação de íons de P que formam complexos de esfera interna com grupos funcionais de superfície. Esta adsorção específica (esfera interna) de ânions torna mais negativa a carga de superfície deslocando deste modo o ponto isoelétrico para um valor mais baixo (Hingston et al., 1974; Sawhney, 1974; Sposito, 1989a). Em solos com carga positiva por exemplo, solos com valores de pH menor que o do PCZ, a adsorção de fosfato provoca maior floculação, pois reduz a quantidade de carga positiva em relação a negativa em direção à nulidade de cargas das partículas. Quando o balanço de cargas é zero, o fosfato adsorvido adicional causa um incremento na dispersão de argila pelo aumento de cargas negativas, tornando os agregados menos estáveis (Lima, 1995)

2.7 Relação do fósforo com os constituintes do solo

Fenômenos da adsorção

Parte da importância que se dá ao fenômeno de adsorção do fosfato em solos deve-se ao fato de que este é um dos ânions mais fortemente retidos por meio de processos de adsorção, principalmente em latossolos (Vasconcellos, 1974; Bahia Filho, 1982). Vários trabalhos tem sido desenvolvidos objetivando determinar expressões matemáticas que expliquem o comportamento do processo de adsorção de P nos solos. De acordo Veith e Sposito (1977), as propostas para possíveis mecanismo de fixação de fósforo sugerem que as reações de adsorção ocorram em dois estágios. O primeiro rapidamente, em uma questão de horas ou mesmo minutos e o segundo em dias ou mesmo meses. Kuo e Lotse (1974) afirmam que esta fase rápida na superfície da hematita e gibbsita é provavelmente

associada a alta energia de adsorção e a baixa saturação da superfície de adsorção. Já o segundo é o mais lento devido ao aumento da carga negativa na superfície dos óxidos bem como do aumento da energia de interação e decréscimo da energia de adsorção. Conforme Veith e Sposito (1977), a etapa mais rápida é considerada a adsorção propriamente dita e a mais lenta precipitação. De acordo com Parfitt, Atkinson e Smart (1975), a adsorção do fosfato está relacionada com o tipo e cristalinidade dos óxidos de ferro e alumínio, podendo a matéria orgânica também limitar esta adsorção, principalmente por competir com o fosfato pelos sítios de adsorção. Afif, Barron e Torrent (1995) constataram um processo lento de adsorção durante o qual há troca de íons orgânicos por fosfato.

Em estudos desenvolvidos em latossolos do Planalto Central, Bahia Filho (1982), concluiu que a goethita foi o principal componente da fração argila responsável pela variação na adsorção máxima de fósforo. Segundo o autor, isto acontece devido a substituição isomórfica do Fe pelo alumínio, que promove alterações no fenômeno de adsorção dos fosfatos. Esta substituição, segundo Resende (1976), provoca um desarranjo estrutural diminuindo o tamanho das partículas, aumentando a área superficial específica, possibilitando assim, uma atração mais acentuada e maior adsorção de fosfatos.

Uma constatação da literatura é o fato da agregação do solo limitar o acesso aos sítios de adsorção no interior dos agregados, diminuindo a velocidade de adsorção de P nas partículas no interior dos mesmos. Lima (1995) e Skropp (1986) sustentam esta afirmação, argumentando que a agregação aumenta a distância entre a solução do solo e os sítios de adsorção, podendo a taxa de adsorção do fosfato ser lenta para os macroagregados, particularmente durante a fase inicial da adsorção do íon.

Estudos em laboratório, desenvolvidos por Willet, Chatres e Nguyen (1988) e Parfitt (1989), com agregados artificiais de óxidos de ferro e alumínio,

mostraram que a cinética de adsorção depende da difusão sólida na superfície da partícula (difusão de superfície) e da difusão na fase líquida, no espaço poroso dos agregados de óxido de ferro. Desta forma, partículas e agregados com porosidades diferentes causam diferenças na acessibilidade de sítios de reações internas e controlam a cinética da adsorção do fosfato.

Sendo a capacidade de suporte de carga do solo dependente dos limites de consistência e, estes por sua vez, influenciados pelas propriedades físicas do solo como textura e estrutura e principalmente pela umidade, a adsorção de fósforo, associada à mineralogia do solo, influencia o balanço de cargas e governa em parte o fenômeno de dispersão. Se este fenômeno de adsorção compromete a estabilidade dos agregados, os parâmetros de consistência e por conseguinte a compactação, são também dependentes dessa reação química no solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição e localização da área

Os solos estudados estão localizados na zona fisiográfica Campos das Vertentes da micro-região Campos da Mantiqueira, entre os paralelos 21° 15' e 21° 50' de latitude sul e os meridianos 44° 15' e 44° 45' de longitude a oeste de Greenwich, no município de São Sebastião da Vitória - MG (Figura 3). Conforme a classificação de Koppen, o clima é do tipo Cwa (mesotérmico com inverno seco e verão chuvoso) com precipitação média anual de 1.435 mm, e chuvas concentradas de novembro a abril. Na área onde se encontra o Latossolo Vermelho Escuro Distrófico a vegetação primária é o cerrado tropical subcaducifólio, e na área do Cambissolo distrófico, predomina campo cerrado tropical. Conforme Brasil (1983), o substrato geológico corresponde às rochas metapelíticas pobres (filitos e micaxistos) do grupo São João Del Rei.

3.2 Solos estudados

Latossolo Vermelho Escuro

Estes solos ocupam em torno de 37.422 ha na região sob influência do Reservatório Itutinga/Camargos, concentrando-se mais na porção norte e nordeste, dos municípios São João Del Rei e Madre de Deus.

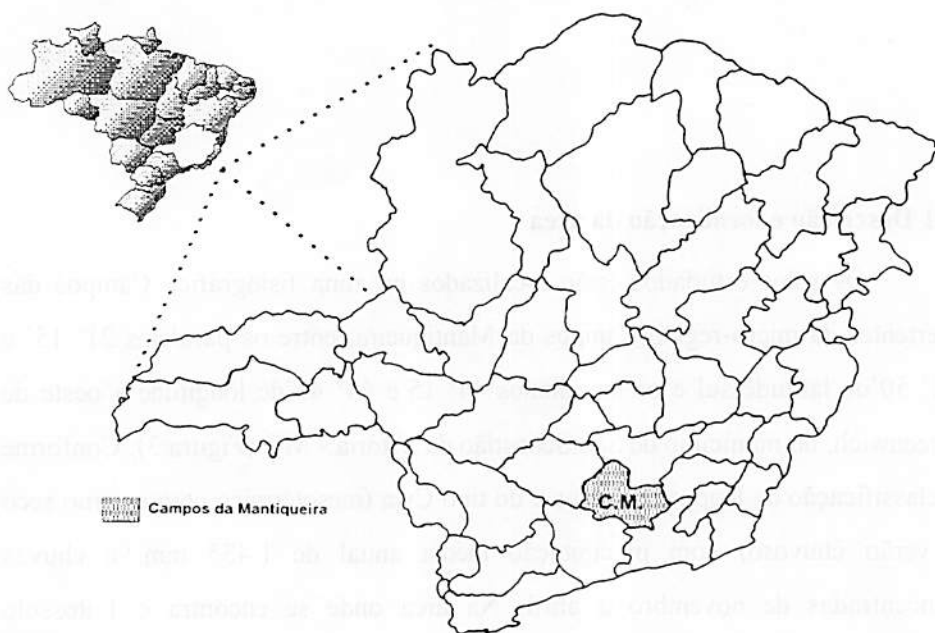


FIGURA 3. Microrregiões homogêneas do Estado de Minas Gerais, com destaque para os Campos da Mantiqueira (CM), região onde estão localizados os solos estudados. (Fonte: Minas Gerais, 1985)

Os Latossolos Vermelho escuros estão geralmente associados à Latossolos Variação Una e Cambissolos Distróficos (Figura 4), derivam de rochas pelíticas pobres das formações Carandaí e Andrelândia do período Pré-Cambriano (Giarolla, 1994). De acordo com a autora esta classe de solo apresenta uma baixa saturação de bases variando de 8 a 17 %, e saturação por alumínio entre 16 a 33 %, no horizonte Bw2. O horizonte A é moderadamente desenvolvido com espessura em torno de 20 cm e teores de carbono orgânico variando de 1,4 a 2,1 %. As relações de K_i e K_r são baixas e variam de 0,6 a 0,71 e de 0,20 a 0,54, respectivamente, tratando-se, portanto de solo oxidico.

O ponto de coleta desta classe localiza-se a cerca de 3 km da BR 265, do lado esquerdo estrada para Jaguará (MG), no terço superior de encosta com 4 % de declive. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Escuro Distrófico com horizonte A moderado textura argilosa fase cerrado tropical subcaducifólio e relevo suave ondulado, tendo a pastagem nativa como uso atual predominante (Giarolla, 1994).

Cambissolo

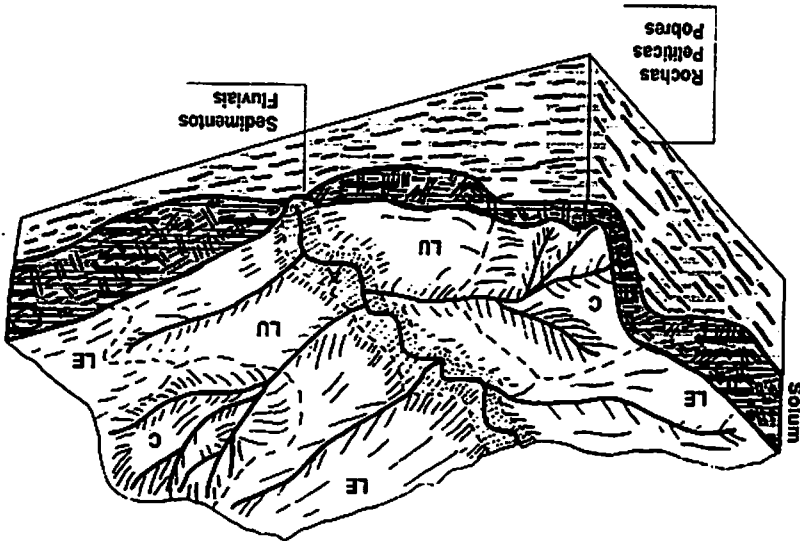
Esta classe compreende solos não hidromórficos, com horizonte B incipiente, possuindo seqüência de horizontes A, B_i, C, estes apresentam geralmente 4 % ou mais de material facilmente intemperizado na fração fina, bem como uma elevada relação silte/argila (Oliveira, Jacomine e Camargo, 1992). Conforme Giarolla (1994) o solo é geralmente forte a moderadamente ácido, o valor pH em água varia de 4,2 a 4,5 no horizonte B_i. A saturação por alumínio no horizonte superficial é em torno de 60 % e saturação por bases entre 8 e 41 %. As relações K_i e K_r estão em torno de 1,54 e 1,16, respectivamente no Horizonte A_p, sendo, neste caso um solo de mineralogia caulinitica.

O ponto de coleta desta classe localiza-se no município de São Sebastião da Vitória (MG), situado no terço médio da encosta com 15 % de declive. O solo é classificado como Cambissolo distrófico epiálico, com horizonte A moderado e textura argilosa. O material de origem são rochas pelíticas pobres do grupo São João Del Rei, tendo como vegetação primária o campo cerrado tropical, e como uso atual predominante a pastagem nativa (Giarolla, 1994).

As amostras tanto indeformadas como deformadas, foram coletadas em duas camadas: 0-3 e 27-30 cm. A primeira camada é caracterizada por valores mais elevados de matéria orgânica, densidade do solo (Ds) mais reduzida e, portanto, mais predisposta aos fatores externos de compactação. Já a segunda camada, localizada à subsuperfície, mais protegida dos fatores externos e diretos de compactação, apresenta valores mais reduzidos de matéria orgânica e valores de Ds mais elevados.

3.3 Amostragem

FIGURA 4. Distribuição esquemática dos solos estudados e associação na paisagem da região sudoeste da microregião dos Campos da Mantiqueira. LE= Latossolo Vermelho Escuro, LU= Latossolo Variável Una; C = Cambissolo. (Fonte: Curi et al., 1994)



A vegetação das áreas de estudo é nativa com presença de subarbustos e predomínio da *Echinolaena inflexa* (Poir) Chase (capim flexinha) (Giarolla, 1994). A justificativa da escolha destes solos deve-se as diferenças nas características físicas, químicas e mineralógicas e a grande importância agronômica e eco-social na região (Giarolla, 1994).

3.4 Tratamentos

Para verificar o efeito da adsorção de P nos parâmetros físicos e na compressibilidade, amostras de material do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro foram tratadas com e sem P.

A forma e a quantidade de fósforo a ser aplicada variaram em função da capacidade máxima de adsorção de cada solo e camada e o tipo de ensaio. Na determinação da estabilidade de agregados, textura e dos limites de consistência as doses de fósforo foram aplicadas junto com o pré-umedecimento e para os ensaios de compressibilidade, durante a saturação dos corpos de prova. Os dados de capacidade máxima de adsorção, as equações de adsorção de P e correlações de aplicação de P nos diferentes ensaios são apresentados posteriormente na tabela 2.

3.5 Caracterização mineralógica

Difratometria de Raios X

As amostras foram caracterizadas por difratometria de Raios-X em aparelho Philips modelo PW 1840, com tubo de cobre e filtro de níquel. Para caracterização de óxidos de Al e argilas silicatadas, o material de solo foi desferrificado a partir do ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), segundo Mehra e Jackson (1960). O material da fração argila orientado em lâminas de vidro foi

submetido ao Raio-X com ângulo 2θ variando de 4 a 32° . Esse material desferrificado foi também submetido a análise térmica diferencial, para quantificação de caulinita e gibbsita, em aparelho fabricado pela BP Engenharia com faixa de temperatura variando de 0 a 800°C .

Os óxidos de ferro foram caracterizados em amostras tratadas com NaOH 5 M (Kampf e Schwertmann, 1982) para concentração dos mesmos. As amostras foram submetidas ao Raio-X com tubo de cobalto e ângulo 2θ variando de 20 a 40° .

A caracterização mineralógica dos solos estudados é apresentada na tabela 1 e figuras A1 a A4.

TABELA 1. Teores de caulinita, gibbsita e relação caulinita/gibbsita determinados por análise térmica diferencial em argila desferrificada do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico.

Camada	Caulinita (Ct)	Gibbsita (Gb)	Ct/(Ct+Gb)
cm	g kg ⁻¹		
Cambissolo			
0-3	450	100	0,81
27-30	443	92	0,82
Latossolo Vermelho Escuro			
0-3	240	400	0,37
27-30	250	380	0,39

3.6 Caracterização química

Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)

A capacidade máxima de adsorção de P para as amostras de cada solo e camada foi feita com base no teor de P remanescente, seguindo a metodologia de Alvarez e Fonseca (1990). O procedimento para a determinação da CMAP empregou uma massa de solo equivalente a 2,5 cm³ de TFSA agitada por 24 horas em 25 ml de CaCl₂ 0,01 M contendo concentrações crescentes de P (Olsen e Watanabe, 1957). Após o tempo de agitação o material foi centrifugado a 2.500 rpm e filtrado e o teor de fósforo do sobrenadante medido por colorimetria de acordo com a metodologia adaptada por Braga e Defelipo (1974). Os resultados da capacidade máxima de adsorção são apresentados na tabela A1.

Os valores de pH em água e KCl 1N, determinados conforme metodologia da EMBRAPA (1997), valores do ponto de carga zero (PCZ) e retenção de cátions, estão apresentados na tabela 2.

Os valores do complexo sortivo e carbono orgânico apresentados na tabela 3, e os óxidos extraídos pelo ataque sulfúrico (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, P₂O₅) na tabela 4, foram determinados de acordo com a metodologia de Vettori (1969) e EMBRAPA (1997).

O teor de óxidos de ferro livre total (Fed), determinado após extração com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), segundo metodologia de Mehra Jackson (1960), e quantificado por colorimetria, também estão apresentados na tabela 4.

TABELA 2. Propriedades eletroquímicas dos solos estudados

Camada	pH		Δ pH	PCZ*	PCZ - pH _{água}	RC**
	H ₂ O	KCl				
cm						cmol g ⁻¹
Cambissolo						
0-3	5,1	4,1	-0,9	3,3	-1,8	0,039
27-30	5,2	4,2	-1,0	3,2	-2,0	0,024
Latossolo Vermelho Escuro						
0-3	5,2	4,4	-0,8	3,6	-1,6	0,033
27-30	5,3	4,6	-0,3	3,9	-1,4	0,013

* Determinado de forma indireta. onde $PCZ = 2 \text{ pH}_{KCl} - \text{pH}_{H_2O}$ (Keng, 1974).

** R.C: Retenção de cátions. (Determinado indiretamente pela expressão: $RC = CTC$ efetiva / g kg⁻¹ % de argila).

TABELA 3. Concentrações e teores do complexo sortivo, acidez potencial, CTC, carbono orgânico, matéria orgânica, soma de bases e saturação por alumínio e por bases¹.

Cama- da	C.O.	M.O	Cátions trocáveis				Acidez potencial		CTC			Saturação	
			P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	t	T	S	m	V
cm		mg kg ⁻¹							cmolc kg ⁻¹				g kg ⁻¹
Cambissolo													
0-3	203	34	1	53	0,9	0,6	0,6	5,6	2,2	7,2	1,6	270	230
27-30	120	21	1	20	0,4	0,2	0,7	5,0	1,4	5,7	0,7	520	120
Latossolo Vermelho Escuro													
0-3	220	38	1	72	1,5	0,2	0,3	6,3	2,2	8,8	1,9	140	230
27-30	170	29	1	31	0,4	0,2	0,2	5,0	0,9	5,7	0,7	230	120

¹ s = soma de bases; m = saturação de alumínio da CTC efetiva; V = saturação de bases da CTC a pH 7; T = CTC a pH 7; t = pH efetiva.



TABELA 4. Teores de óxidos do ataque sulfúrico, ferro extraído pelo DCB (Fe_d) e pelo oxalato de amônio (Fe_o) e relações moleculares do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro nas camadas de 0-3 e 27-30 cm.

Camada cm	Ataque sulfúrico					Relações moleculares			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe	Fe _o	Ki	Kr
g kg ⁻¹									
Cambissolo									
0-3	250	265	145	8.60	0.69	37	1.3	1.61	1.19
27-30	258	283	151	9.20	0.65	35	1.0	1.55	1.15
Latossolo Vermelho Escuro									
0-3	136	316	156	6.90	1.02	63	1.9	0.73	0.56
27-30	137	306	163	8.52	0.81	59	1.6	0.76	0.57

3.7 Análises físicas

As análises físicas foram determinadas nas condições com e sem P. O tratamento com P foi feito adicionando-se P para se atingir a capacidade máxima de adsorção de cada amostra durante as etapas de pré umedecimento ou de saturação das amostras de acordo com o parâmetro a ser avaliado.

As análises granulométricas foram feitas pelo método da pipeta (Day, 1965), empregando-se NaOH como dispersante químico e agitação rápida de 12.000 rpm por 15 minutos.

A densidade do solo (D_s) foi determinada em amostras com estrutura indeformada coletadas com o amostrador de Uhland (Blake e Hartge, 1986a) e a densidade de partículas pelo método do picnômetro, conforme metodologia da

EMBRAPA (1997). O volume total de poros (VTP) foi determinado com base na expressão de Danielson e Sutherland (1986):

$$VTP = \left[1 - \left(\frac{Ds}{Dp} \right) \right] \quad [1]$$

onde:

VTP = volume total de poros ($m^3 m^{-3}$)

Ds = densidade do solo ($Mg m^{-3}$)

Dp = densidade de partículas ($Mg m^{-3}$)

A macro e microporosidade foram determinadas em amostras indeformadas com e sem fósforo, utilizando a unidade de sucção a 60 cm de altura de coluna de água, após saturação prévia da amostra. A água retida nas amostras, após atingido o equilíbrio, correspondeu a microporosidade, que foi determinada pela equação:

$$Microporosidade (m^3 m^{-3}) = \frac{(a - b)}{c} \quad [2]$$

onde :

a : peso da amostra após ser submetida a uma sucção de 60 cm de coluna de água (g)

b : peso da amostra seca a 105 - 110^o C (g)

c : volume do cilindro de 84,80 (cm^3)

A macroporosidade foi determinada pela diferença entre o volume total de poros (VTP) e a microporosidade.

A umidade atual gravimétrica e o volume de saturação foram determinados de acordo com EMBRAPA (1997).

A estabilidade de agregados foi determinada através de tamisamento úmido. As amostras foram submetidas a um pré umedecimento lento, de acordo com Kemper e Rosenau (1986). O diâmetro médio geométrico (DMG) foi calculado conforme Kemper e Chepil (1965), pela expressão que segue:

$$DMG = 10^{\left[\frac{\sum (n \log d)}{\sum n} \right]} \quad [3]$$

onde :

DMG : diâmetro médio geométrico (mm)

n : percentual de agregados retidos na peneira (mm)

d : diâmetro médio da faixa de tamanho do agregado (mm)

Determinou-se também argila dispersa em água (ADA) segundo o método da EMBRAPA (1997) e por adaptação no método da pipeta procedeu-se a determinação da argila dispersa com P (ADP), usando como fonte o KH_2PO_4 . As concentrações de P fornecidas foram equivalentes à CMAP de 10 g de TFSE de acordo com o solo e a camada estudada.

Os valores de argila total (AT), argila dispersa em água (ADA), e argila dispersa com P (ADP) obtidos pela análise granulométrica foram utilizados para determinar o índice de floculação (IF), calculado pela expressões abaixo:

$$IF_1 = \left(\frac{AT - ADA}{AT} \right) \cdot 100 \quad [4]$$

$$IF_2 = \left(\frac{AT - ADP}{AT} \right) \cdot 100 \quad [5]$$

Onde :

IF_1 : índice de floculação empregando o ADA água ($g \text{ kg}^{-1}$)

IF_2 : índice de floculação empregando o ADP ($g \text{ kg}^{-1}$)

AT : argila total empregando o NaOH ($g \text{ kg}^{-1}$)

ADA : argila dispersa em água ($g \text{ kg}^{-1}$)

ADP : argila dispersa com P ($g \text{ kg}^{-1}$)

Foram determinados o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o limite de contração (LC) utilizando-se do mercúrio, de acordo com Sowers (1965). Para verificar o efeito do fósforo nestes limites, incubou-se amostras com KH_2PO_4 durante o pré-tratamento, conforme a capacidade de adsorção máxima de cada solo e a sua camada de coleta.

O limite de liquidez, foi determinado pela equação:

$$LL = a + b \cdot \log (x) \quad [6]$$

Onde :

LL : limite de liquidez ($kg \text{ kg}^{-1}$)

x : número de golpes correspondentes a 25

a e b : parâmetros ajustados

O limite de plasticidade foi obtido a partir da média de umidade de cinco bastonetes de 3 mm de diâmetro. O limite de contração foi calculado em função da expressão que segue:

$$LC = \left[Um - \left(\frac{Vi - Vf}{Ms} \right) \right] \cdot Da \quad [7]$$

Onde

LC : limite de contração (kg kg⁻¹)

Um : umidade de moldagem (kg kg⁻¹)

Vi : volume inicial do corpo de prova (cm³)

Vf : volume final do corpo de prova (cm³)

Ms : massa de sólidos (g)

Da : densidade da água (g cm⁻³)

3.8 Compressibilidade dos solos

Coleta e preparação das amostras

Para os ensaios de compressibilidade os corpos de prova de 6,52 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura foram coletados com estrutura indeformada nas camadas de 0-3 e 27-30 cm. Em laboratório, as amostras foram devidamente preparadas e saturadas por capilaridade, com e sem solução de P, conforme sua capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP). Após 48 horas, as amostras foram transferidas para o extrator de placa porosa para equilibrar as faixas de sucção de 2, 10 e 1500 kPa. As umidades gravimétricas de 25 e 0,05 kg kg⁻¹ foram equilibradas naturalmente à temperatura ambiente, já que não é possível obter estes teores a partir de sucções utilizadas normalmente em laboratório. Depois de equilibradas as mesmas foram submetidas aos ensaios de compressibilidade.

Ensaio de compressibilidade

Os ensaios foram realizados segundo metodologia de Dias Junior (1994), usando um consolidômetro da marca Boart Longyear (Figura 5). As pressões foram aplicadas até que 90% da máxima deformação fosse alcançada (Taylor, citado por Holtz e Kovacs, 1981). Após atingir esta condição, novas pressões foram aplicadas na seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. O índice de compressão foi estimado como sendo a inclinação da reta de compressão virgem, como mostrado na figura 3 (Bradford e Gupta, 1986) e a pressão de preconsolidação conforme Dias Junior e Pierce (1995).

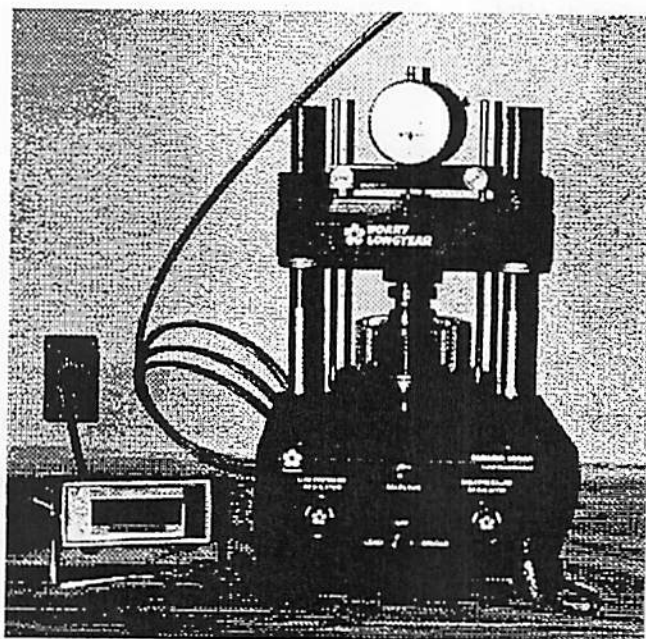


FIGURA 5. Consolidômetro da marca Boart Longyear, utilizado nos ensaios de compressão uniaxiais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Efeito da adsorção de P na microporosidade e na estabilidade de agregados

Os valores da densidade do solo, macro e microporosidade, volume total de poros, umidade atual e de saturação do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro nas camadas de 0-3 cm e 27-30 cm estão apresentados na tabela 5.

TABELA 5. Valores¹ de Densidade do solo, macro e microporosidade, volume total de poros, umidade atual e de saturação do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico nas camadas de 0-3 e 27-30 cm.

Camada	Condição	Ds	VTP	Micro	Macro	Umidade	
		Cilindro				Us	Ua
—cm—		Mg m ⁻³	m m ⁻³		kg kg ⁻¹		
Cambissolo							
0-3	Com fósforo	0,90	0,64	0,46	0,18	0,64	0,32
	Sem fósforo	0,96	0,62	0,42	0,19	0,61	0,28
27-30	Com fósforo	1,04	0,62	0,50	0,12	0,58	0,37
	Sem fósforo	1,10	0,60	0,41	0,19	0,51	0,31
Latossolo Vermelho Escuro							
0-3	Com fósforo	1,07	0,18	0,42	0,60	0,58	0,30
	Sem fósforo	1,06	0,22	0,38	0,60	0,52	0,31
27-30	Com fósforo	1,05	0,21	0,41	0,62	0,52	0,32
	Sem fósforo	1,06	0,23	0,38	0,62	0,50	0,31

¹ Média de três repetições; Ds: densidade do solo; Macro: macroporos; Micro: microporos; VTP: volume total de poros; Us: umidade de saturação; Ua: umidade atual.

O efeito dispersivo causado pela adsorção de P parece condicionar maior microporosidade e umidade atual e de saturação, sem efeito evidente na densidade do solo, macroporosidade e volume total de poros (Tabela 5). Com a dispersão ocorre um aumento da área específica do agregado, implicando em uma maior retenção de água.

Na tabela 6 estão apresentados os resultados observados da estabilidade de agregados em água e os valores de diâmetro médio geométrico (DMG). Os valores de agregados estáveis dos dois solos em ambas as camadas, com tamanho de 7-2 mm, na condição com P, apresentaram-se ligeiramente menores que o da condição sem P. Verifica-se na camada de 0-3 cm de ambos os solos maior estabilidade, o que se deve aos teores relativamente mais elevados de matéria orgânica. O índice DMG também mostra o efeito do fósforo na desagregação. Estes resultados são devido ao abaixamento do PCZ, que aumenta a carga líquida negativa do solo, favorecendo o fenômeno de dispersão.

No caso do Latossolo Vermelho Escuro, os teores mais elevados de argila (Tabela 7), que propiciam maior interação com a matéria orgânica, explicam a maior estabilidade na camada de 0-3 cm. Tal fato não foi observado no Cambissolo devido, provavelmente aos teores mais elevados de silte que, além de menor interação com a matéria orgânica, é menos reativo apresentando, portanto, menor predisposição a agregação.

TABELA 6. Valores¹ de estabilidade de agregados em água, diâmetro médio geométrico (DMG) do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro .

Camada	Condição	Classe de tamanho de agregados (mm)						Frações		Índice DMG
		7,0 -2,0	2,0 -1,0	1,0 - 0,5	0,5 - 0,25	0,25 - 0,105	< 0,105	> 2,00	< 0,25	
g kg ⁻¹ ————— mm —————										
Cambissolo										
0-3	Com fósforo	630	41	32	29	3	233	630	267	1,27
	Sem fósforo	654	40	31	26	30	216	654	247	1,40
27-30	Com fósforo	619	36	33	27	25	258	619	283	1,18
	Sem fósforo	678	20	17	12	2	257	678	267	1,35
Latossolo Vermelho Escuro										
0-3	Com fósforo	756	13	10	10	8	201	751	205	1,79
	Sem fósforo	771	10	7	5	6	199	771	222	1,89
27-30	Com fósforo	612	61	41	28	29	226	612	255	1,28
	Sem fósforo	672	44	28	16	14	224	672	238	1,47

¹Médias de três repetições.

TABELA 7. Teores¹ de argila, areia e silte, índice de floculação (IF), argila dispersa em água (ADA) e argila dispersa com fósforo (ADP) do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro.

Camada cm	NaOH			ADP			ADA	IF	
	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	ADA	ADP
Cambissolo									
0-3	570	133	416	390	20	590	303	468	316
27-30	588	10	406	463	16	520	316	462	272
Latossolo Vermelho Escuro									
0-3	663	10	327	320	43	663	150	774	517
27-30	685	10	305	410	33	556	185	730	401

¹ Média de três repetições.

Outra evidência do efeito desagregante da adsorção de P, como mostrado na tabela 7, é a redução no índice de floculação nas amostras que receberam P. O aumento no teor de partículas dispersas, da mesma forma que de agregados menores que 0,25 mm, propicia o melhor arranjo da massa de solo predispondo o solo a compactação.

Com base ainda na tabela 7, verifica-se que os valores da fração de argila do Latossolo Vermelho Escuro obtidos pela dispersão com NaOH foram superiores as frações do Cambissolo nas duas camadas estudadas. Os valores das frações de areia e silte foram superiores no Cambissolo. Estas frações granulométricas e o estado avançado de intemperismo em particular no Latossolo Vermelho Escuro, refletem a constituição primária das rochas das quais se formaram estes solos, neste caso, sedimentos argilo-siltoso metamorfisados (Almeida e Resende, 1985).

Os valores de argila dispersa em água (ADA) (Tabela 7) foram maiores no Cambissolo, mostrando a maior suscetibilidade a desagregação em

comparação com o Latossolo Vermelho Escuro. Os valores de ADA tenderam a aumentar em profundidade em ambos os solos, o que pode ser decorrente da diminuição dos teores de matéria orgânica.

Os teores de argila obtidos a partir da dispersão com P (ADP), foram menores que aqueles obtidos com NaOH. Contudo, quando da comparação com os obtidos pelo ADA, foram consideravelmente superiores, refletindo o efeito dispersivo deste elemento. Pela análise dos dados, percebe-se que este efeito foi mais intenso no Latossolo Vermelho Escuro, principalmente na camada de 27-30 cm, podendo ser atribuído à maior capacidade adsortiva desta camada, devido aos altos teores de argila e baixos teores de matéria orgânica, como observado Van Raij (1973b). Ressalte-se ainda a mineralogia oxidica deste solo, principalmente gibbsita e goethita, minerais de alta afinidade à retenção do fósforo.

Os valores de índice de floculação (IF) encontrados a partir do ADA foram maiores para o Latossolo Vermelho Escuro, mostrando que, no estado natural, sem P, esse solo mantém maior estabilidade de agregados comparado ao Cambissolo.

4.2 Efeito da adsorção de P nos limites de consistência

Os valores para os limites de liquidez, plasticidade e contração, índices de plasticidade e zona de friabilidade são apresentados na tabela 8. O deslocamento dos limites de consistência para valores mais elevados de umidade, nos tratamentos com fósforo, foi verificado independente da classe de solo ou camada estudada. Este aumento nos limites de consistência são decorrentes do aumento da área específica ocasionado pela dispersão dos agregados pelo efeito da adsorção do fósforo, estando em consonância com os teores de argila obtidos a partir do ADA e ADP, concordando também com Caputo (1977). Entretanto, tão importante quanto a quantidade de argila, é o tipo de argila, que de acordo

Ahmed, Swindale e El-Swaify (1969), pode causar efeitos diferenciados principalmente no LL e LP. Assim, os valores mais elevados dos limites de consistência verificados no Cambissolo em relação aos valores do Latossolo Vermelho Escuro podem ser atribuídos a uma mineralogia caulinitica, presença de silte e material facilmente intemperizado, evidenciando o estágio jovem deste solo. Conforme Ahmed, Swindale e El-Swaify (1969), solos mais jovens necessitam de um maior teor de umidade para atingir o estado de plasticidade, quando comparados a solos altamente intemperizados e com uma mineralogia mais oxidica.

No Latossolo Vermelho Escuro a adsorção de P aumentou a zona de friabilidade, fato inverso ao observado no Cambissolo. Isto mostra que, mais do que a mineralogia caulinitica, elevando os limites de liquidez e plasticidade, estão os óxidos de ferro através da agregação diminuído estes limites, visto que, que a adsorção aumenta a dispersão das partículas e neutraliza em parte o efeito agregante dos óxidos, aumentando os limites de consistência.

Ainda conforme a tabela 8 e de acordo com Oliveira (1979), os índices de plasticidade verificados no Cambissolo nas camadas estudadas e na condição em que o solo foi submetido ao tratamento com fósforo permitem classificá-lo como altamente plástico. Já o Latossolo Vermelho Escuro, na condição em que não foi tratado com fósforo, classificou-se como moderadamente plástico, porém em decorrência do efeito do fósforo, passou a ser altamente plástico. Assim, esses resultados evidenciam o que foi dito anteriormente.

TABELA 8. Limites de liquidez (LL), limites de plasticidade (LP), limites de contração (LC), índice de plasticidade, zona de friabilidade e grau de saturação do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico das camadas de 0-3 e 27-30 cm.

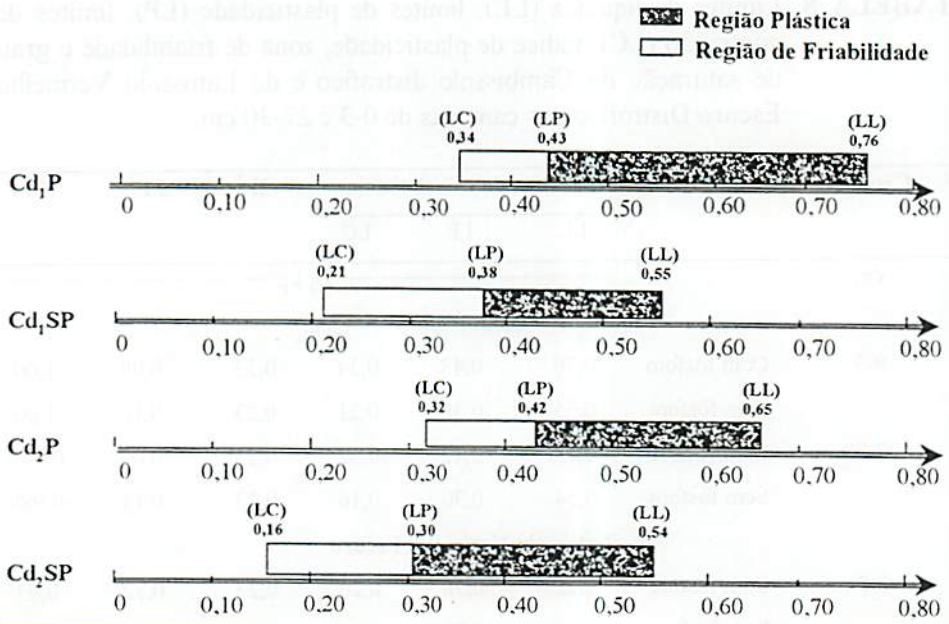
Camada	Condição	Limites de Consistência			IP ¹	ZF ²	S ³
		LL	LP	LC			
cm		kg kg ⁻¹					
Cambissolo							
0-3	Com fósforo	0,76	0,43	0,34	0,33	0,09	1,00
	Sem fósforo	0,55	0,38	0,21	0,23	0,16	1,00
27-30	Com fósforo	0,65	0,42	0,32	0,23	0,09	0,970
	Sem fósforo	0,54	0,30	0,16	0,23	0,13	0,980
Latossolo Vermelho Escuro							
0-3	Com fósforo	0,62	0,38	0,26	0,23	0,12	0,93
	Sem fósforo	0,44	0,32	0,22	0,12	0,10	0,95
27-30	Com fósforo	0,57	0,34	0,21	0,22	0,13	0,89
	Sem fósforo	0,39	0,24	0,15	0,15	0,08	0,91

¹ Índice de plasticidade; ² zona de friabilidade; ³ grau de saturação.

No tocante ao limite de contração, poucas são as informações divulgadas na literatura. Isto de certa forma, limitou a compreensão dos possíveis fenômenos que ocorreram no solo nesta condição de umidade. De acordo com os resultados obtidos (Tabela 8), os maiores valores do limite de contração foram observados no Cambissolo, em particular na condição em que o solo foi tratado com fósforo na camada de 0-3 cm, mantendo o mesmo comportamento observado nos limites de liquidez e de plasticidade. Como significado prático o limite de contração serve para determinar, juntamente com limite de plasticidade, a zona de friabilidade (Tabela 8 e Figura 6), isto é, a faixa de umidade adequada que o solo pode trabalhado.

4.3 Efeito da adsorção de P nas curvas compressão

As curvas de compressão (Figura 1) foram obtidas plotando-se a densidade do solo (Ds) em função da pressão aplicada (σ). Destas curvas pode-se obter i) as pressões de preconsolidação (σ_p), que divide a curva de compressão em dois segmentos distintos: a curva de compressão secundária e a reta de compressão virgem, as quais determinam a região de elasticidade e plasticidade do solo, e o ii) índice de compressão (m) que de acordo com Culley e Larson (1987) e Larson et al. (1980) é o declive da reta de compressão virgem, que também faz parte dos parâmetros que definem a curva de compressão do solo,



podendo mudar em função da classe de solo, manejo e umidade inicial (Dias Junior, 1994). De acordo com Kondo (1998) além da σ_p e do m , a D_{s_i} (densidade do solo inicial, antes do ensaio de compressibilidade) e a D_s , são parâmetros que também definem a curva de compressão do solo.

As curvas de compressão apresentadas nas figuras de 7 a 10 variaram de acordo com a classe de solo, camada, umidade e principalmente com a adsorção de fósforo. As curvas de compressão obtidas para a condição com P e para uma mesma umidade foram deslocadas em geral, para baixo em relação às curvas de compressão da condição sem P, sendo este deslocamento em função da densidade inicial do solo (D_{s_i}) que agiu como um regulador de posição. Estes resultados estão de acordo com Larson, Gupta e Useche (1980), Dias Junior (1994) e Kondo (1998).

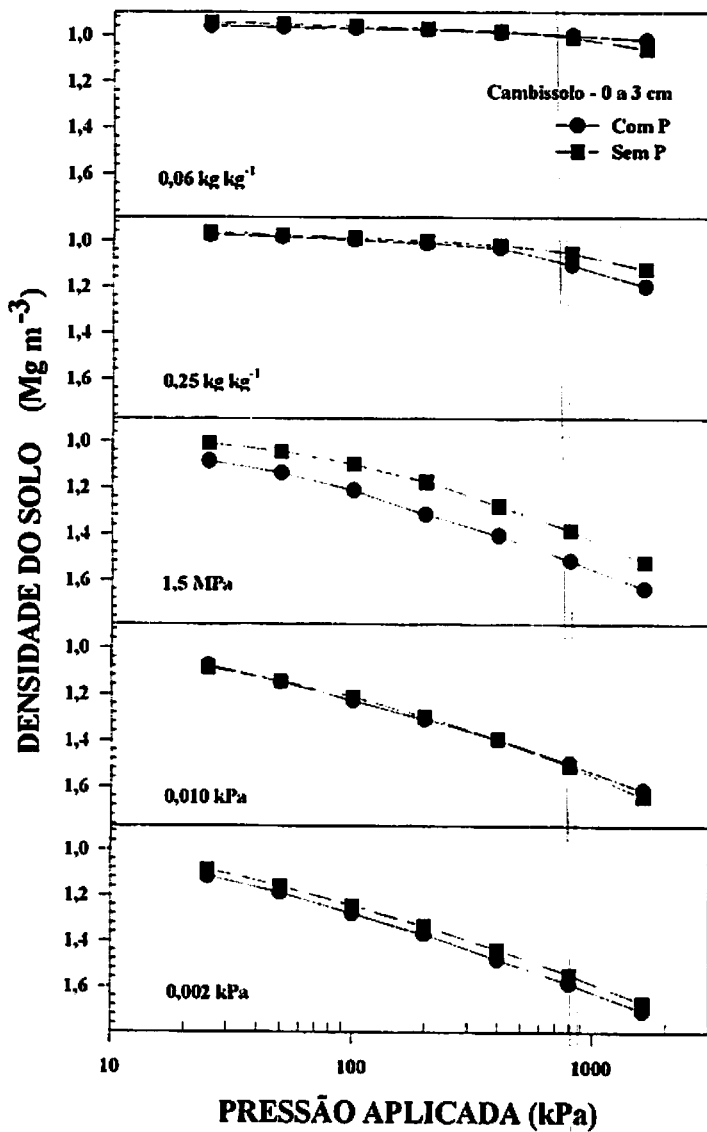


FIGURA 7. Curvas de compressão das condições com e sem P do Cambissolo na camada de 0-3 cm, sob diferentes umidades gravimétricas.

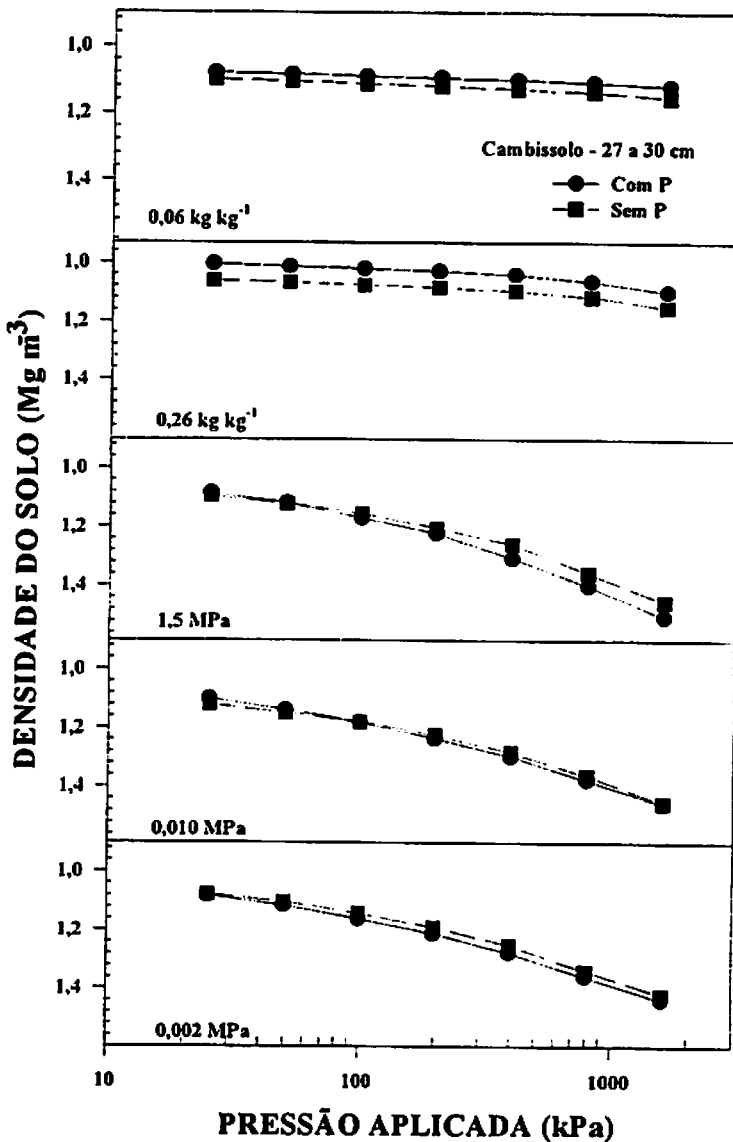


FIGURA 8. Curvas de compressão das condições com e sem P do Cambissolo na camada de 27-30 cm, sob diferentes umidades gravimétricas.

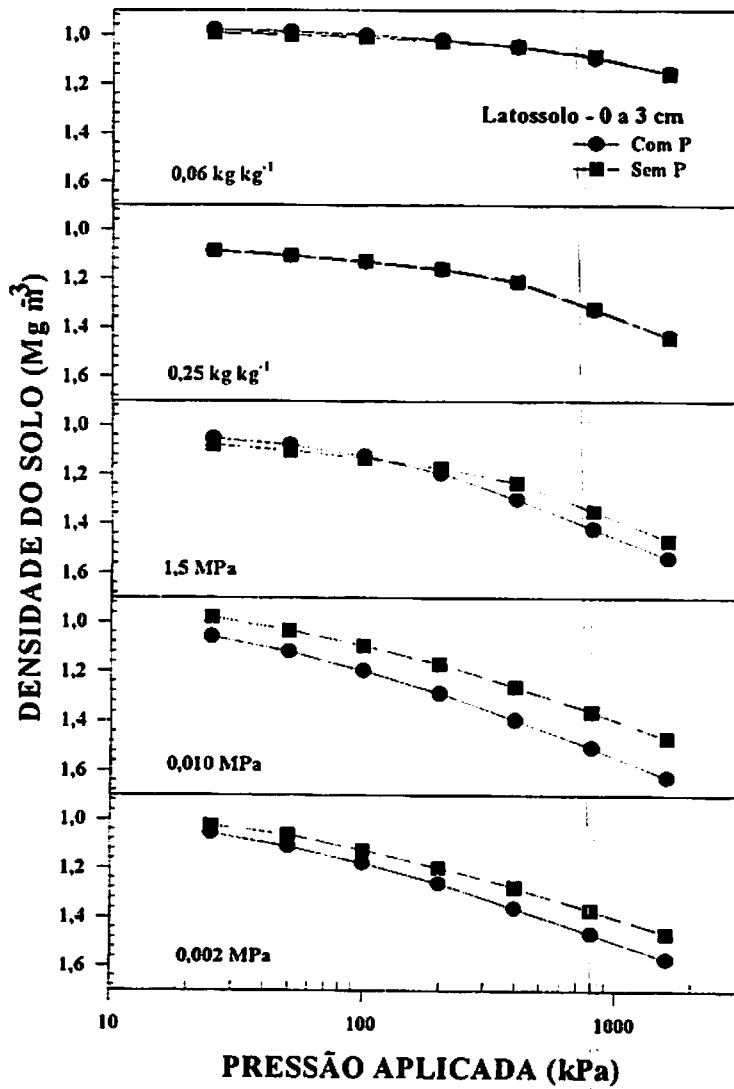


FIGURA 9. Comportamento das curvas de compressão das condições com e sem P do Latossolo Vermelho Escuro na camada de 0-3 cm, sob diferentes umidades gravimétricas.

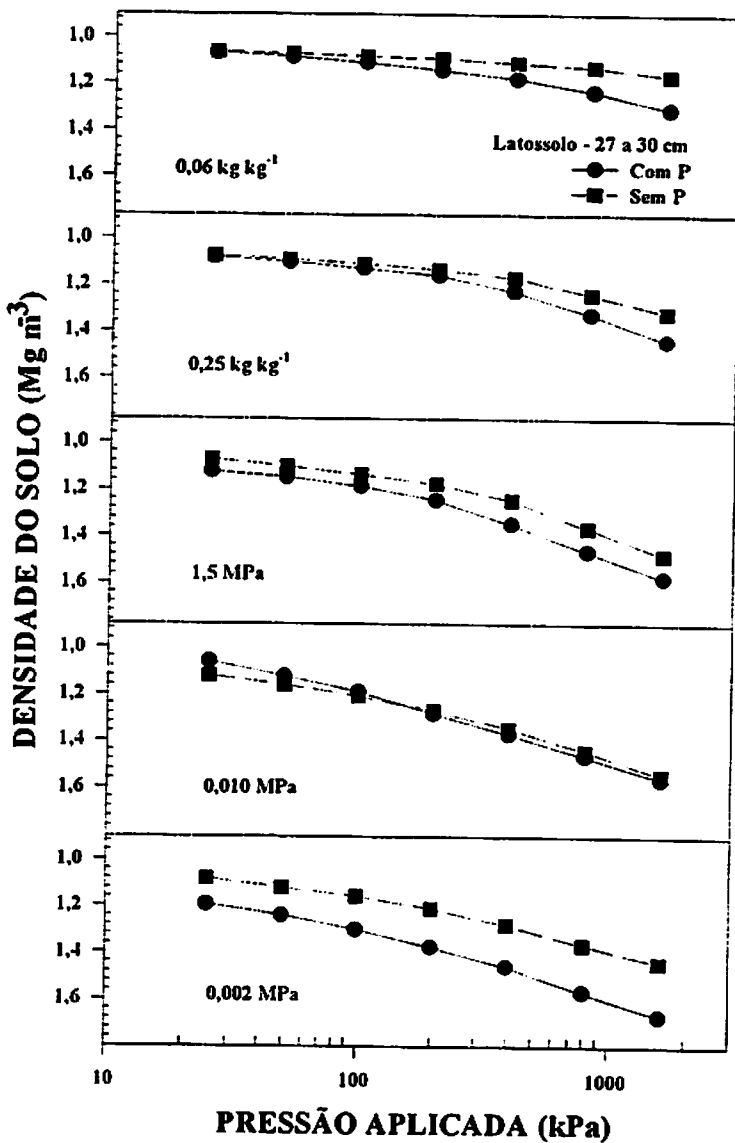


FIGURA 10. Curvas de compressão das condições com e sem P do Latossolo Vermelho Escuro na camada de 27-30 cm, sob diferentes umidades gravimétricas.

Para eliminar o possível efeito da densidade inicial (D_{si}) (Tabelas A2 e A3) nas curvas de compressão, fez-se a normalização destas, isto é, dividiu-se os valores de D_s das amostras após o ensaio de compressão pelo valores de D_{si} (Figuras 11 a 14). As curvas de compressão para a condição com fósforo deslocaram-se para baixo em relação às curvas sem fósforo, tornando mais evidente o efeito da adsorção de P nas mesmas.

O maior deslocamento das curvas de compressão para baixo e para a esquerda, verificado nas amostra tratadas com P (Figuras 11 a 14), está associado aos maiores teores de água retidos nestas, em decorrência de uma maior dispersão. Isto provavelmente é devido ao aumento da área específica que ocorre com a dispersão, que condiciona uma maior microporosidade, como mostrado na tabela 5. Desta forma, nas amostras onde a umidade (fator regulador do comportamento compressivo do solo) foi equilibrada por sucção, a quantidade de água retida na amostra foi uma função dos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo, sendo a variação do teor de água uma função da classe de solo e da condição estudada. Já nas umidades equilibradas por peso (0,05 e 0,25 kg kg^{-1}), onde esta variação foi devidamente controlada, verifica-se um menor deslocamento entres as curvas de compressão (Tabela A1 e A3).

Não foi verificado um paralelismo entre as retas de compressão virgem. Esta evidência está em concordância com Dias Junior (1994) e Kondo (1998), o que provavelmente está associado a ampla faixa de umidade usada neste estudo, quando comparada a faixa de umidade usada por Larson, Gupta e Useche (1980).

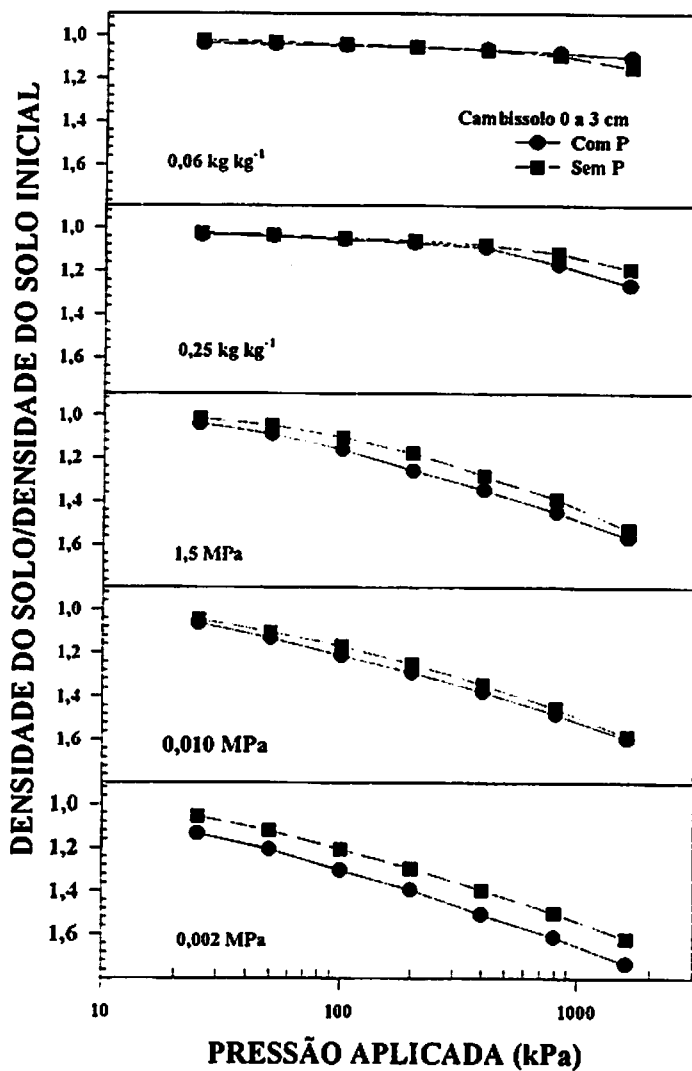


FIGURA 11. Curvas de compressão normalizadas das condições com e sem P do Cambissolo na camada de 0-3 cm, sob diferentes umidades gravimétricas.

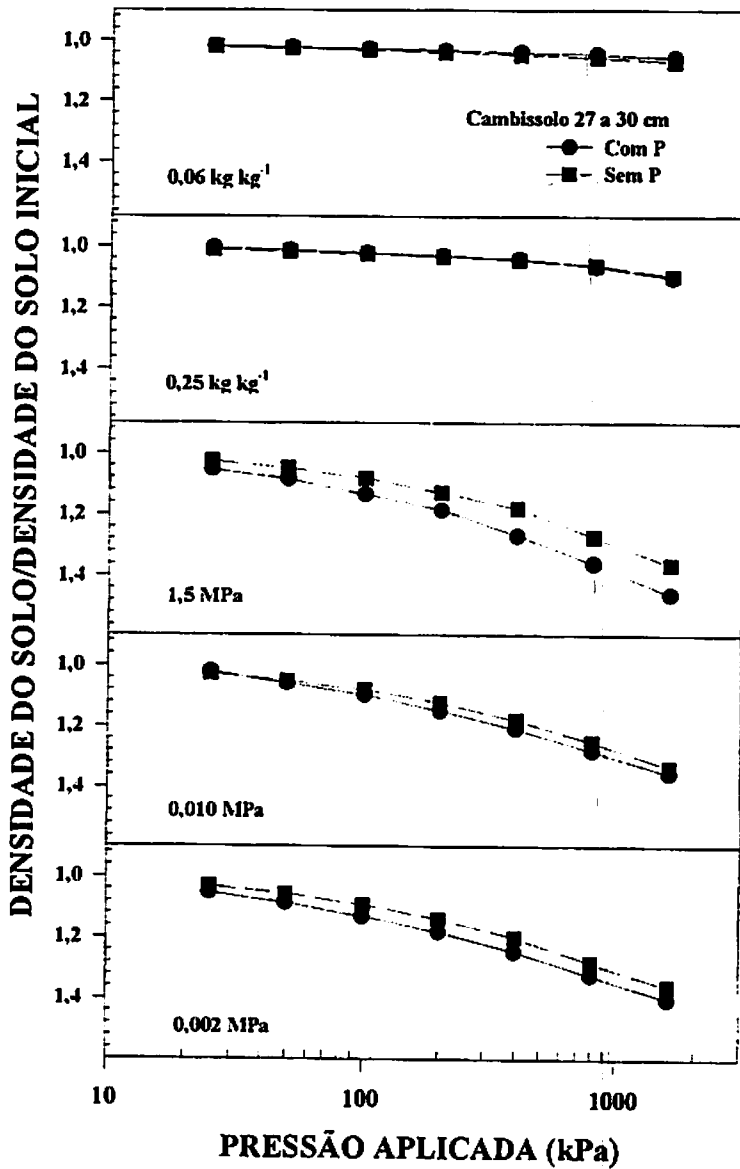


FIGURA 12. Curvas de compressão normalizadas das condições com e sem P do Cambissolo na camada 27-30 cm, em sob diferentes umidades gravimétricas.

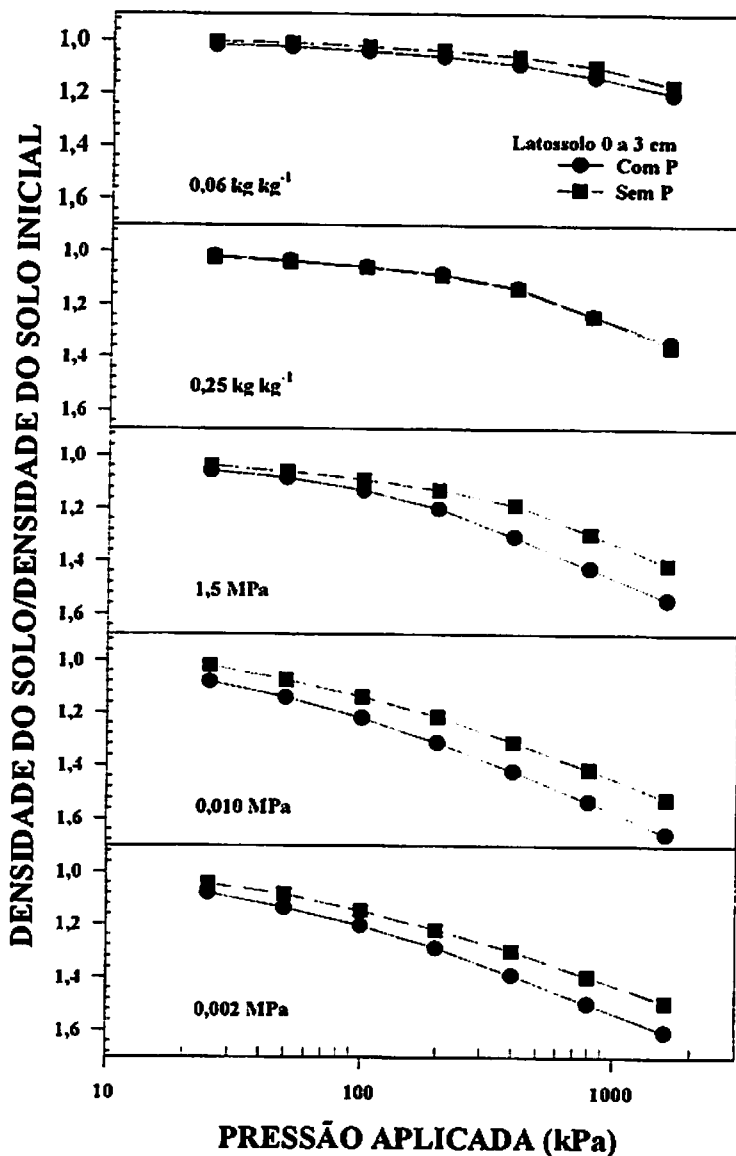


FIGURA 13. Curvas de compressão normalizadas das condições com e sem P do Latossolo Vermelho Escuro na camada 0-3 cm, sob diferentes umidades gravimétricas

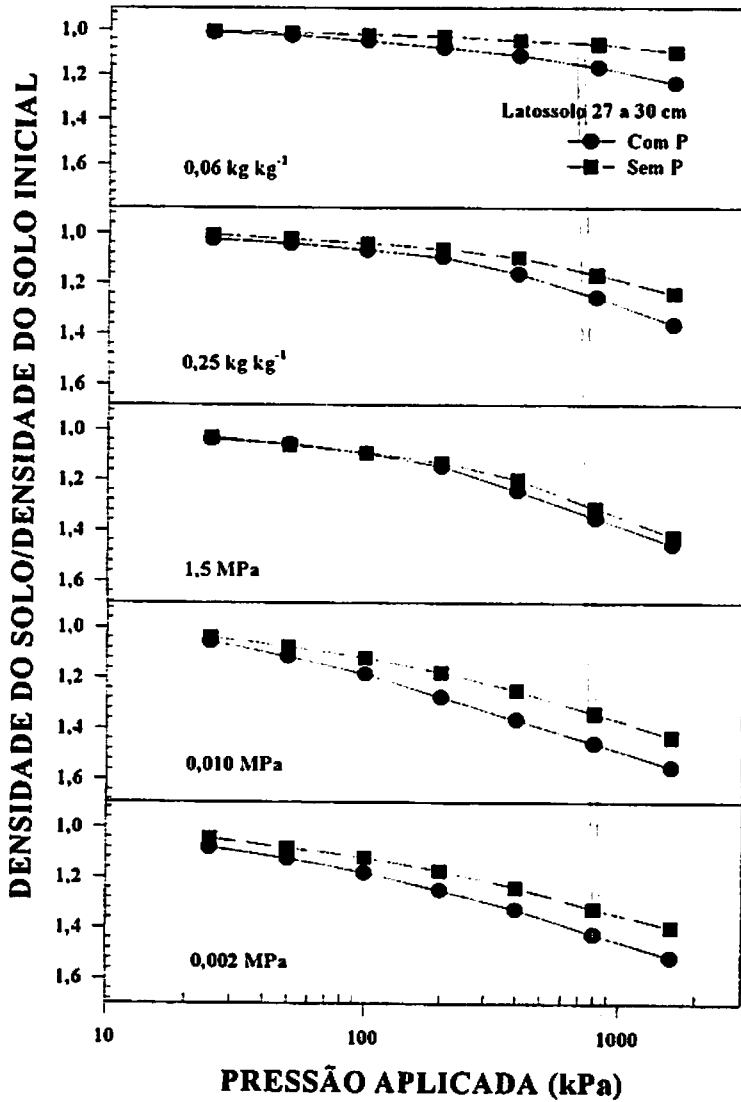


FIGURA 14. Curvas de compressão normalizadas das condições com e sem P do Latossolo Vermelho Escuro na camada 27-30 cm, sob diferentes umidades gravimétricas.

As curvas de compressão do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro nas camadas 0-3 e 27-30 cm, na condição com e sem P, são apresentadas nas figuras de 15 a 18.

O Cambissolo sofreu menores deformações do que o Latossolo Vermelho Escuro nas duas camadas para a condição de umidade de 0,05 e 0,25 kg kg⁻¹ (Figuras 15 a 18). Este comportamento pode estar associado a distribuição de suas frações granulométricas, e a mineralogia caulinitica, que conferem ao solo, quando seco estrutura mais compacta.

A inversão da posição das curvas, observada para sucções menores que 1,5 Ma, na condição sem e com P (Figuras 15 e 17) onde as curvas de compressão do Latossolo Vermelho Escuro apresentam um deslocamento para baixo e para a esquerda quando comparado ao Cambissolo, pode ser atribuída à maior D_s (Tabelas A2 e A3) e a menor microporosidade apresentada por este solo, como mostrado na tabela 5, reduzindo desta forma, o efeito compressivo do solo (Dias Junior 1994, Kondo, 1998).

As curvas de compressão do Latossolo Vermelho Escuro na camada 27-30 cm nas condições sem e com P, estão deslocadas para baixo e para a esquerda em relação às curvas do Cambissolo para sucções menores que 1,5 MPa, devido a sua maior densidade do solo inicial e ao maior teor de matéria orgânica (Tabela 3). Na condição com P, em particular, este deslocamento se deve também ao maior favorecimento das ligações específicas do íon fosfato com os sítios de troca dos óxidos. Estas ligações aumentam a densidade de carga negativa do colóide com abaixamento do PCZ e por conseguinte aumenta a dispersão, favorecendo a compactação deste solo (Hingston Posner e Quirk, 1974; Sawhney, 1974; Sposito 1989a).

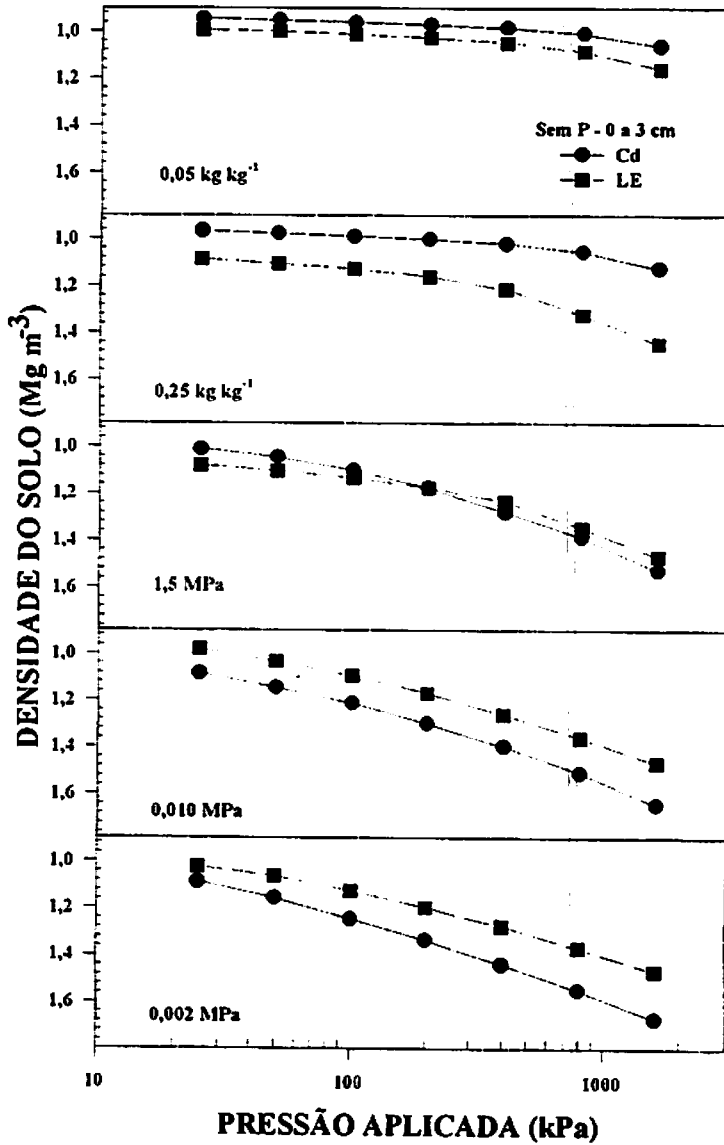


FIGURA 15. Curvas de compressão do Latossolo Vermelho Escuro e do Cambissolo da camada 0-3 cm, na condição sem P, sob diferentes umidades gravimétricas.

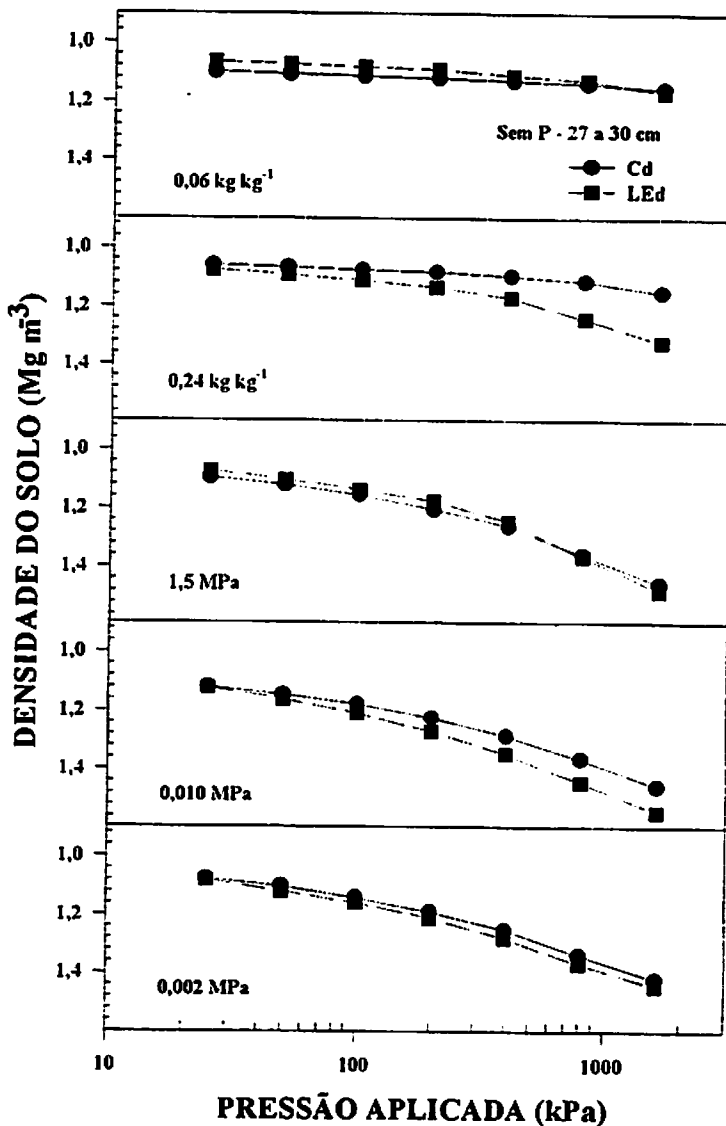


FIGURA 16. Curvas de compressão do Latossolo Vermelho Escuro e do Cambissolo da camada 27-30 cm, na condição sem P, sob diferentes umidades gravimétricas.

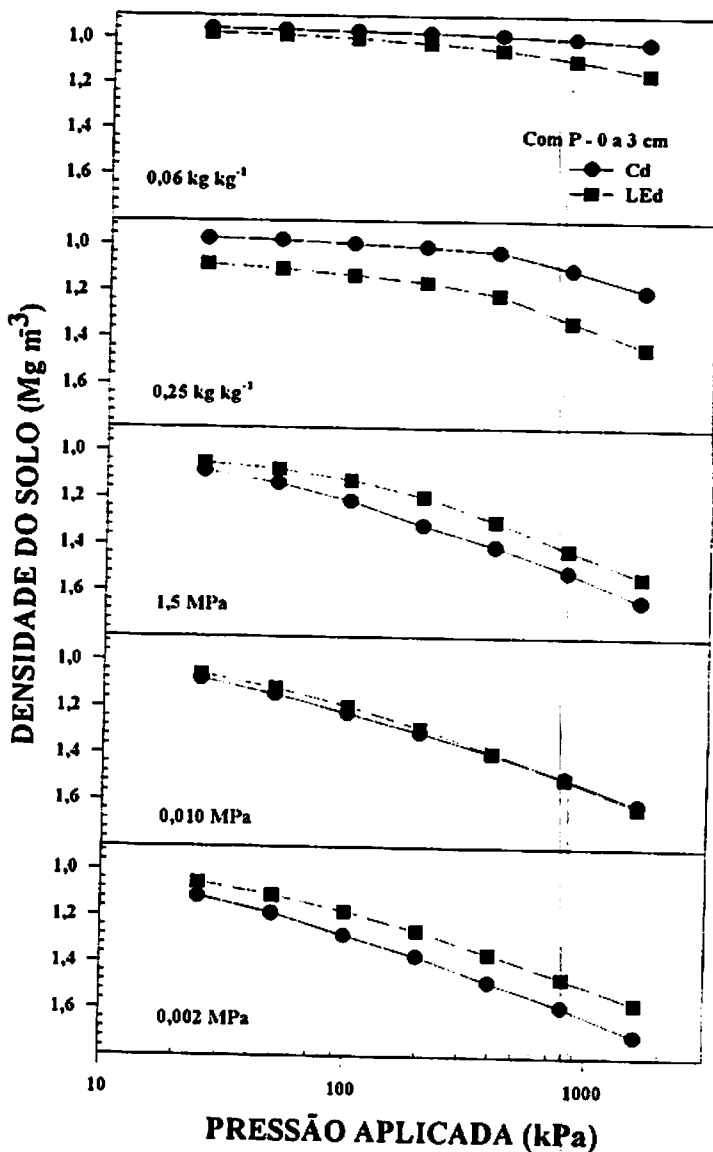
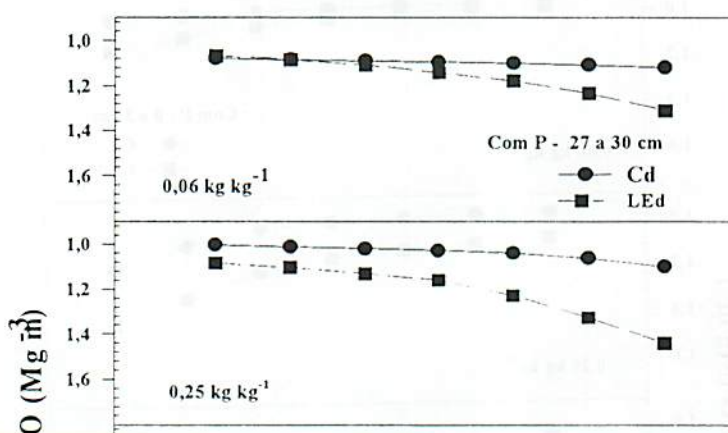


FIGURA 17. Curvas de compressão do Latossolo Vermelho Escuro e do Cambissolo da camada 0-3 cm, na condição com P, sob diferentes umidades gravimétricas.

corroboram a aplicabilidade do modelo quadrático para relacionar estes dois parâmetros para as classes de solos estudadas, como concordam com Dias Junior (1994) e Kondo (1998).

De maneira geral, nos dois solos a camada 0-3 cm apresenta maiores valores de $m_{\text{máximo}}$ do que a camada 27-30 cm. Tal fato, na condição sem P, está associado aos teores mais elevados de matéria orgânica. Entretanto, na condição com P essa matéria orgânica pode ter reduzido as ligações específicas do íon fosfato com os óxidos, reduzindo parcial ou quase que totalmente a resposta à adsorção de P, como observado na camada 0-3 cm. No Latossolo Vermelho



Escuro observa-se que a camada 27-30 cm, na condição com P, apresentou maiores valores de $m_{\text{máximo}}$ do que a condição sem P. A maior resposta para a adsorção de P nesta camada, diferente da camada 0-3 cm, se deve aos menores teores de matéria orgânica, o que provavelmente favoreceu uma maior adsorção (Tabela A1), e por conseguinte, uma maior dispersão. Assim, embora perceba-se uma maior suscetibilidade das camadas superficiais à compactação, é na camada subsuperficial de solos oxídicos onde verifica-se um maior efeito da adsorção de P.

TABELA 9. Umidade máxima ($U_{\text{ótima}}$), índice de compressão máximo ($m_{\text{máximo}}$) e os parâmetros das equações de regressões obtidos a partir da relação entre o índice de compressão (m) e a umidade (U) para o Cambissolo distrófico epialco e o Latossolo Vermelho Escuro Distrófico nas camadas de 0-3 e 27-30 cm para as condições com e sem fósforo, conforme o modelo quadrático ($m = aU^2 + bU + c$).

Camada	Condição	Parâmetros de ajuste das Equações			R^2	$m_{\text{máximo}}$	$U_{\text{ótima}}$	LP	n
		a	b	c					
Cambissolo									
0-3	Sem P	-0,343	0,813	0,108	0,76	0,46	0,56	0,38	15
	Com P	-2,020	1,896	0,038	0,87	0,41	0,46	0,43	15
27-30	Sem P	-1,040	1,173	-0,029	0,72	0,30	0,45	0,30	15
	Com P	-1,133	1,246	-0,052	0,73	0,29	0,54	0,42	15
Latossolo Vermelho Escuro									
0-3	Sem P	-2,550	1,490	0,176	0,71	0,39	0,28	0,32	15
	Com P	-2,070	1,490	0,132	0,82	0,39	0,37	0,38	15
27-30	Sem P	-3,070	1,930	0,030	0,70	0,33	0,31	0,24	15
	Com P	-1,530	0,950	0,220	0,52	0,37	0,31	0,34	15

Como observado por Kondo (1998), verifica-se na maioria dos casos estudados uma certa proximidade entre os valores de umidade ótima do $m_{\text{máximo}}$ e a umidade encontrada para o limite de plasticidade (Tabela 9). De acordo com Kondo (1998) isto pode dar uma idéia razoável da umidade em que solo está mais suscetível a compactação. Na prática esta observação pode servir de inferência a respeito da umidade no qual o solo não deve ser trabalhado (Hillel, 1982).

Para a condição com e sem P em ambas as camadas (Figuras 19 e 20), o índice de compressão dos dois solos aumenta com o teor de umidade, até atingir um ponto de máximo, a partir do qual volta a diminuir, mostrando que para uma compressibilidade máxima existe uma umidade ótima (Hillel, 1982).

Na camada superficial, tanto na condição com P, como sem P, verifica-se que o Latossolo Vermelho Escuro apresentou maiores índices de compressão até o teor de umidade de aproximadamente $0,38 \text{ kg kg}^{-1}$. Entretanto, a partir deste teor de umidade, os valores de m do Latossolo Vermelho Escuro passaram a reduzir, ocorrendo por outro lado, um aumento dos valores de m do Cambissolo (Figuras 19a e 19b). Deste modo, pode-se inferir que o índice de compressão máximo de cada solo varia com a umidade, que por sua vez depende dos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo. Desta forma, o Latossolo Vermelho Escuro, por atingir o índice de compressão máximo em menores umidades do que o Cambissolo, atinge também condições adversas ao preparo do solo primeiro do que este.

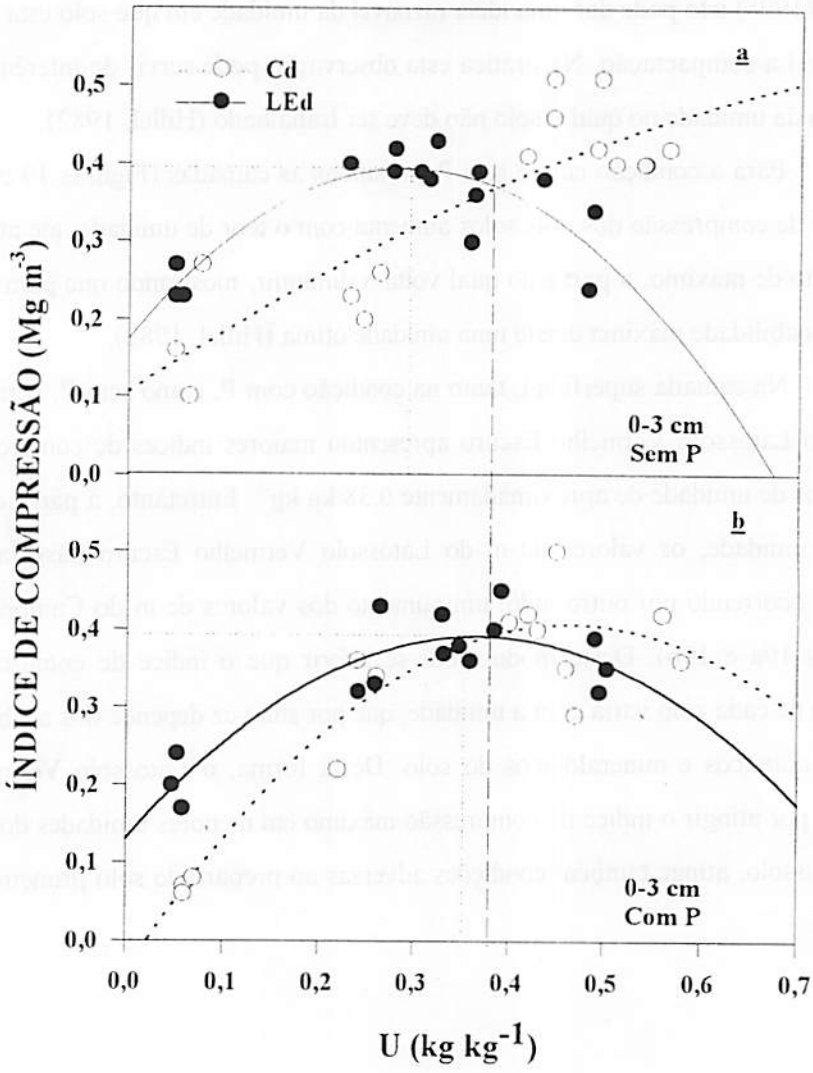


FIGURA 19. Índice de compressão (m) em função da umidade (U) do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro da camada 0-3 cm, na condição com e sem P.

Os índices de compressão da camada 27-30 cm, para as condições com e sem P (Figura 20), mantém o mesmo comportamento da camada 0-3 cm, como mostrado na figura 19. Nessa camada, assim como na superficial, foi verificada uma superioridade dos valores de m do Latossolo Vermelho Escuro até um determinado teor de umidade, a partir do qual decresce, prevalecendo a partir dessa umidade os valores de m do Cambissolo. Para a condição sem P (Figura 20a) estas umidades, onde verifica-se a interseção das curvas ajustadas, é aproximadamente $0,43 \text{ kg kg}^{-1}$ e na condição com P, $0,55 \text{ kg kg}^{-1}$.

O deslocamento da interseção das curvas ajustadas de m na camada 27-30 cm, na condição com P (Figura 20b), com relação a camada 0-3 cm da condição sem P (Figura 21a) para maiores valores de umidade, pode ser atribuído à adsorção de P, que condicionou uma maior dispersão favorecendo um aumento da microporosidade, como mostrado na tabela 5.

Os valores de m na condição com P do Latossolo Vermelho Escuro da camada 27-30 cm (Figura 21b) foram superiores aos valores das amostras da condição sem P. Entretanto, na camada de 0-3 cm (Figura 21a) esta superioridade só ocorre a partir do teor de umidade de aproximadamente $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$, onde verifica-se a interseção das curvas ajustadas da condição com e sem P. O aumento de m da condição com P a partir desta umidade torna esta camada mais susceptível à compactação, mostrando mais uma vez o efeito da adsorção de P no processo de compactação do solo. Ainda com base na figura 21 verifica-se uma superioridade dos valores dos índices de compressão máximos da camada superficial (Figura 21a), em relação a camada subsuperficial tanto na condição com P quanto sem P, mostrando assim, a maior suscetibilidade desta camada à compactação.

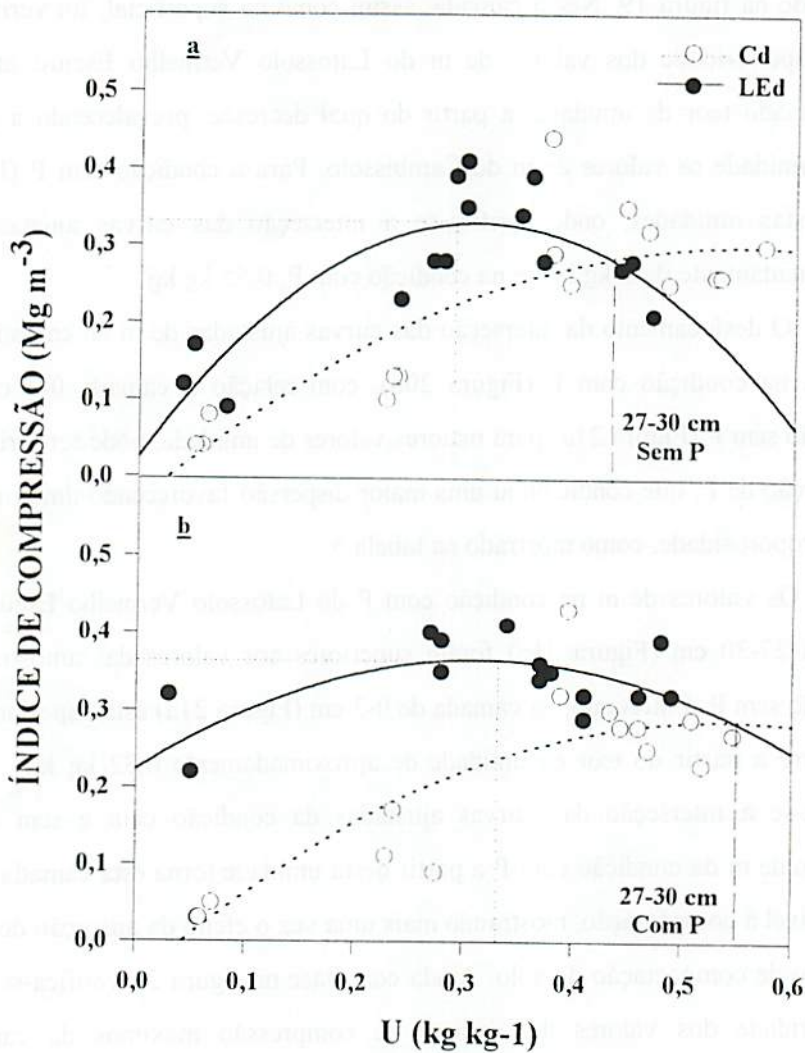


FIGURA 20. Índice de compressão (m) em função da umidade (U) do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro da camada 27-30 cm, na condição com e sem P.

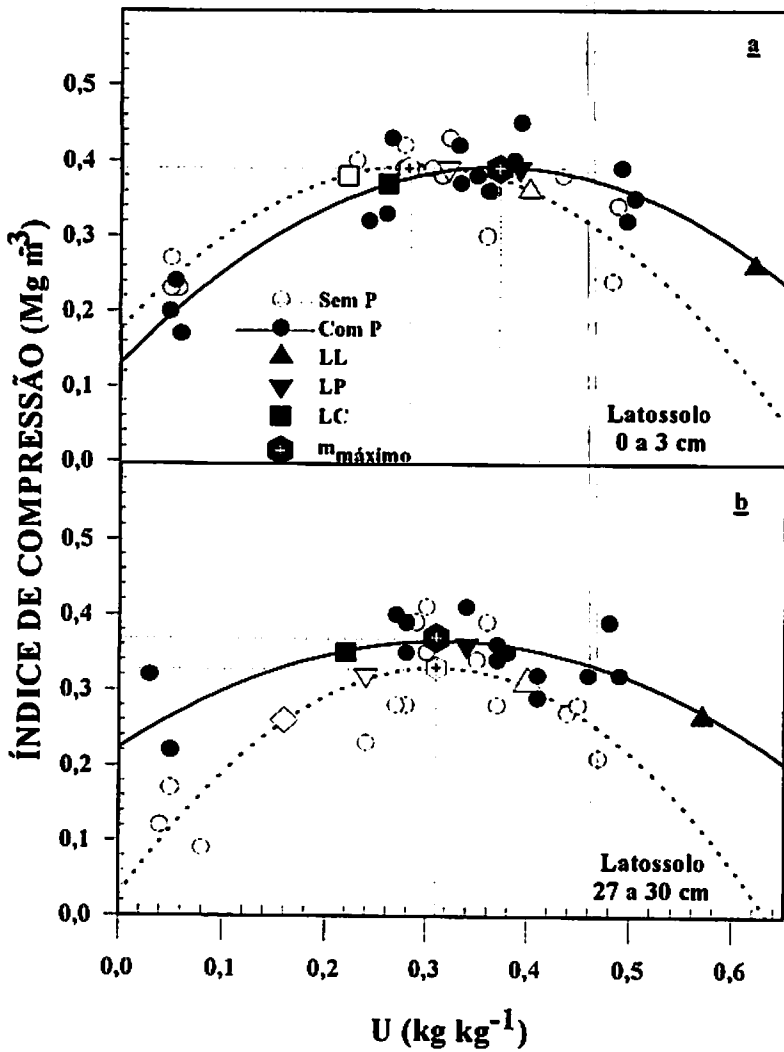


FIGURA 21. Índice de compressão (m) em função da a umidade (U) das condições com e sem P do Latossolo Vermelho Escuro, nas camadas 0-3 e 27-30 cm.

Os limites de consistência da condição com P, (Figuras 21a e 21b), deslocaram-se para valores mais elevados de umidade. Esse deslocamento ocorreu por causa da maior retenção de água, o que pode ser atribuída ao aumento da dispersão, devido a adsorção de P, em decorrência dos maiores teores de óxidos dessa camada (Tabela 4).

A tendência linear da curva ajustada para o índice de compressão da camada 0-3 cm na condição sem P do Cambissolo (Figura 22a), provavelmente está associada a erros de caráter metodológico, já que tal comportamento não foi verificado nas outras condições de estudo. Assim, não é justificada inferência de uma menor ou maior suscetibilidade à compactação da condição com e sem P nesta camada em função do índice de compressão máximo.

A inexistência de resposta à adsorção de P da camada 27-30 cm do Cambissolo (Figura 22b), diante da hipótese levantada neste estudo, se deve às características químicas como baixa capacidade de adsorção de P (Tabela A1) e principalmente mineralógicas, em decorrência dos baixos teores de óxidos (Tabela 4). Assim, as altas umidade encontradas neste solo para os limites de consistência (Tabela 8), que influíram no índice de compressão, se devem mais à sua estrutura em blocos e mineralogia caulinitica, que intensificam uma maior retenção de água.

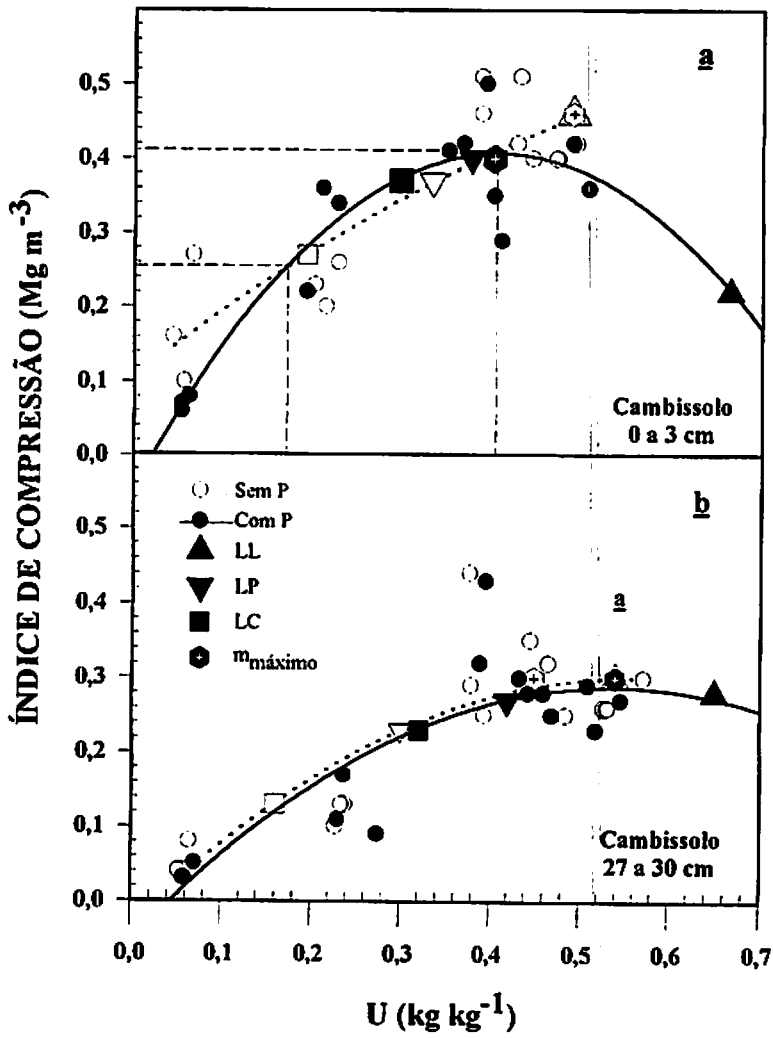


FIGURA 22. Índice de compressão (m) em função da umidade (U) das condições com e sem P do Cambissolo, nas camadas 0-3 e 27-30 cm.

4.5 Efeito da adsorção de P no modelo de compressibilidade baseado na história de tensão do solo

A partir das curvas de compressão, obtiveram-se as pressões de preconsolidação (σ_p). Estas foram plotadas em função dos teores de umidade (U), fornecendo equações que validam o modelo proposto por Dias Junior (1994) e Dias Junior e Pierce (1996). As equações obtidas foram do tipo:

$$\sigma_p = 10^{(a+bU)} \quad [9]$$

onde:

σ_p : pressão de preconsolidação (kPa)

a, b : parâmetros de ajuste

U : umidade gravimétrica (kg kg^{-1})

Os coeficientes de determinação variaram de 0,72 a 0,90 (Tabela 10) ao nível de 5% de significância, assegurando o poder explicativo da qualidade do ajuste dos modelos encontrados, que foram fortemente influenciados pela classe de solo, camada e a condição estudada (com e sem P). A análise de variância, ajuste dos parâmetros com seus respectivos coeficientes de determinações dos dados observados e ajustados, erro padrão e o ajuste do teste, podem ser vistos na tabela A4.

As pressões de preconsolidação plotadas em função da umidade dos solos estudados na condição com e sem P das camadas 0-3 e 27-30 cm são apresentadas nas figuras 23 a 27. Pela análise das figuras verifica-se que a σ_p diminui em função do aumento dos teores de umidade, independente do tipo de solo, camada ou condição estudada, concordando com Dias Junior (1994) e Kondo (1998).

Na camada 0-3 cm da condição sem P (Figura 23a) o Latossolo Vermelho Escuro apresentou menores valores de σ_p que o Cambissolo. Estes menores valores de σ_p verificado no Latossolo, representam uma menor capacidade de suporte de carga deste solo, e está associada a sua estrutura granular que confere uma menor resistência à compactação diante da ação de forças externas. Por outro lado, a mineralogia caulinitica do Cambissolo e a estrutura em blocos conferem a este solo maior resistência à compactação.

Na condição com P (Figura 23b), observa-se um deslocamento para baixo das curvas das pressões de preconsolidação (σ_p) versus a umidade (U) em relação ao eixo das umidades, implicando em menores pressões de preconsolidações em ambos os solos. Este fato mostra que a adsorção de P condiciona uma menor resistência às pressões aplicadas, resultando em uma menor capacidade suporte de carga. Com base na figura 23a, para uma umidade de $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$, por exemplo, verifica-se uma variação de aproximadamente 80 kPa para o Latossolo Vermelho Escuro e 60 kPa para o Cambissolo entre a condição com e sem P na camada 0-3 cm. Esta variação não apenas aponta o efeito do P no deslocamento das curvas de $\sigma_p = f(U)$, como também mostra uma redução da capacidade de suporte de carga dos solos, mostrando assim, uma maior suscetibilidade do Latossolo Vermelho Escuro à compactação. Entretanto, parece haver um paradoxo quando compara-se este resultado com as determinações da estabilidade de agregados, distribuição das partículas granulométricas, DMG, IF e teores de matéria orgânica. Conforme os resultados encontrados na caracterização física (Tabelas 6 e 7), era de se esperar que o Cambissolo apresentasse uma maior suscetibilidade à compactação, o que não ocorreu. Este comportamento parece está relacionado com a composição mineralógica gibbsitica do Latossolo Vermelho Escuro, que condiciona uma estrutura granular e proporciona uma menor capacidade de suporte de carga.

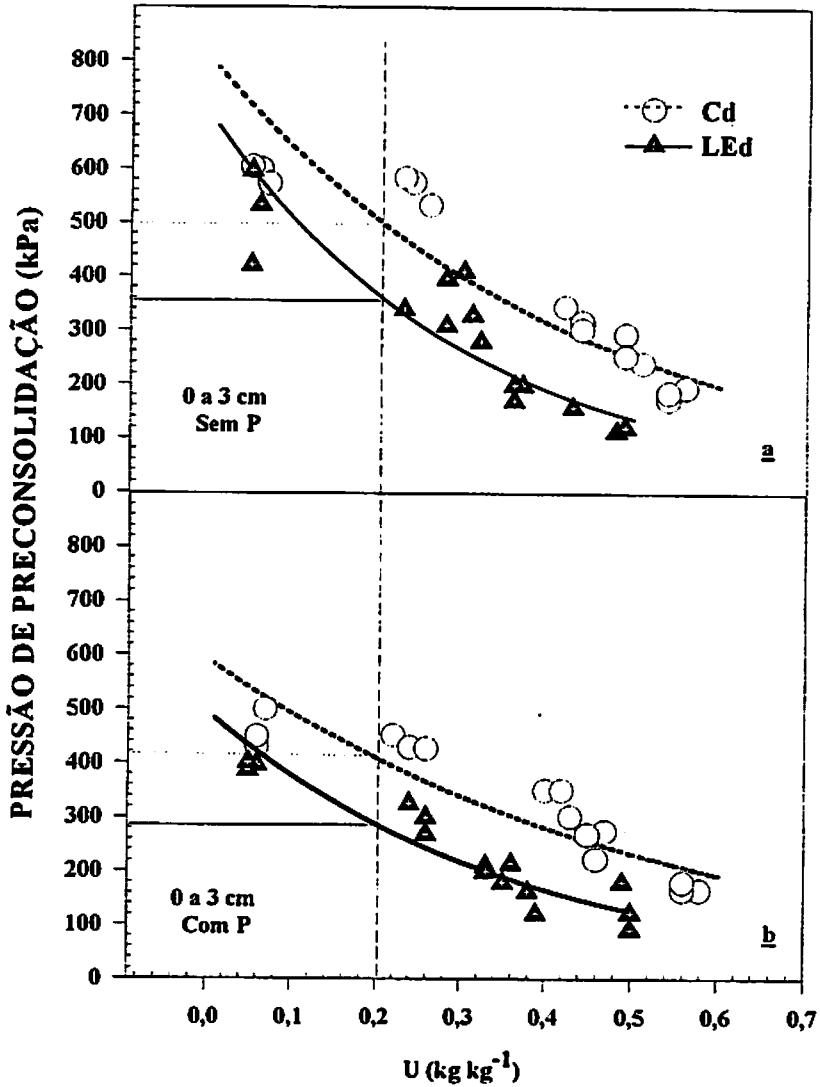


FIGURA 23. Pressões de preconsolidação (σ_p) em função da umidade (U) do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro, para a condição com e sem P, na camada de 0-3 cm.

Na camada 27-30cm (Figura 24), as σ_p comportaram-se tal como na camada 0-3 cm (Figura 23), isto é, também diminuíram exponencialmente em função do aumento da umidade. Em ambas as condições o Latossolo Vermelho Escuro apresentou menor capacidade de suporte de carga que o Cambissolo. Conforme as figuras (24a e 24b), tanto na condição com como sem P, para os valores mais elevados de umidade verifica-se um menor deslocamento relativo entre as curvas de $\sigma_p = f(U)$ dos solos estudados, resultando em menores σ_p para valores mais elevados de umidade, independente do solo, condição e camada estudada. Todavia, pela análise da figura 24b, verifica-se que para valores mais baixos de umidade ocorre um aumento no deslocamento relativo entre as curvas de compressão dos dois solos. Este aumento parece estar associado às menores pressões de preconsolidação oferecidas pelo Latossolo Vermelho Escuro. A redução nas σ_p para o Latossolo Vermelho Escuro está associada a mineralogia gibbsítica e estrutura granular, que a partir de uma maior adsorção de P, torna-se mais facilmente compressivo. Este resultado está também em consonância com as curvas de compressão da camada subsuperficial da condição com e sem P dos solos estudados (Figura 10) e com os índices de compressão máximos encontrados para o Latossolo Vermelho Escuro (Figura 21b).

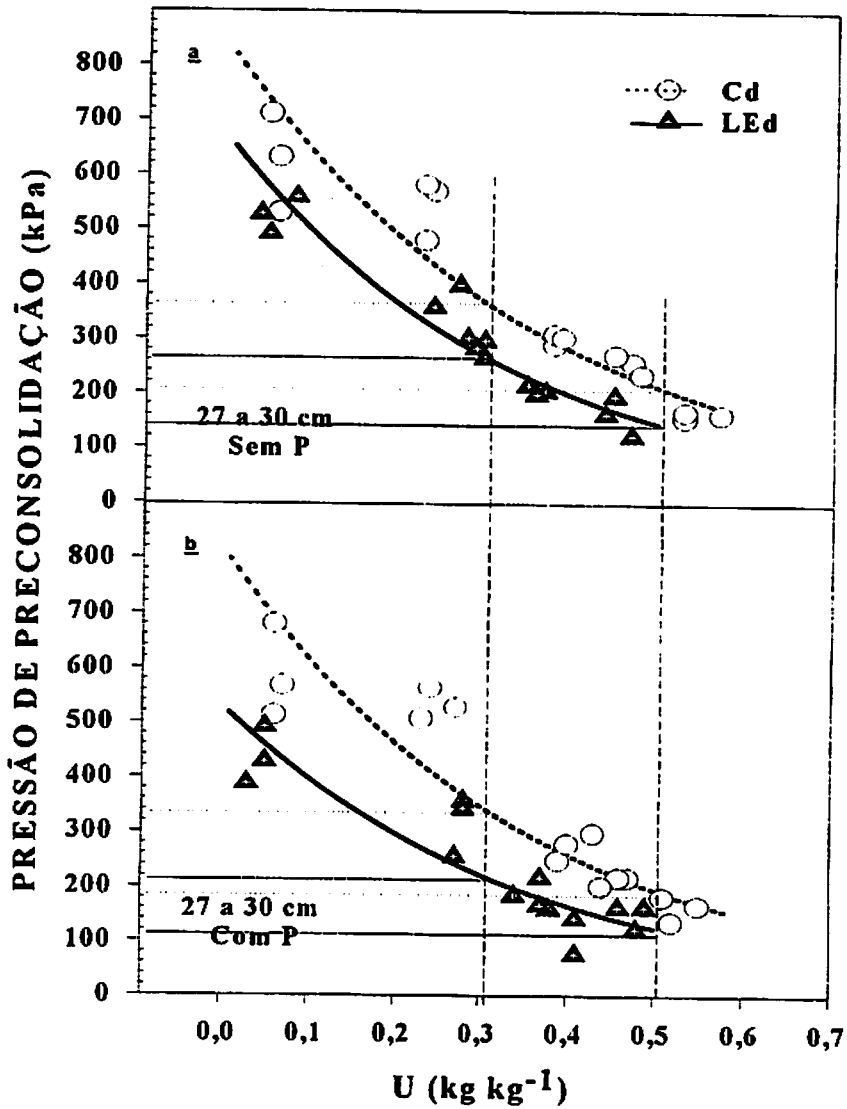


FIGURA 24. Pressões de preconsolidação (σ_p) em função da umidade (U) do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro, para a condição com e sem P, na camada de 27 a 30cm.

Para efeito de comparação entre camadas, os valores de σ_p do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro na condição com P, foram plotados em função da umidade (Figura 25).

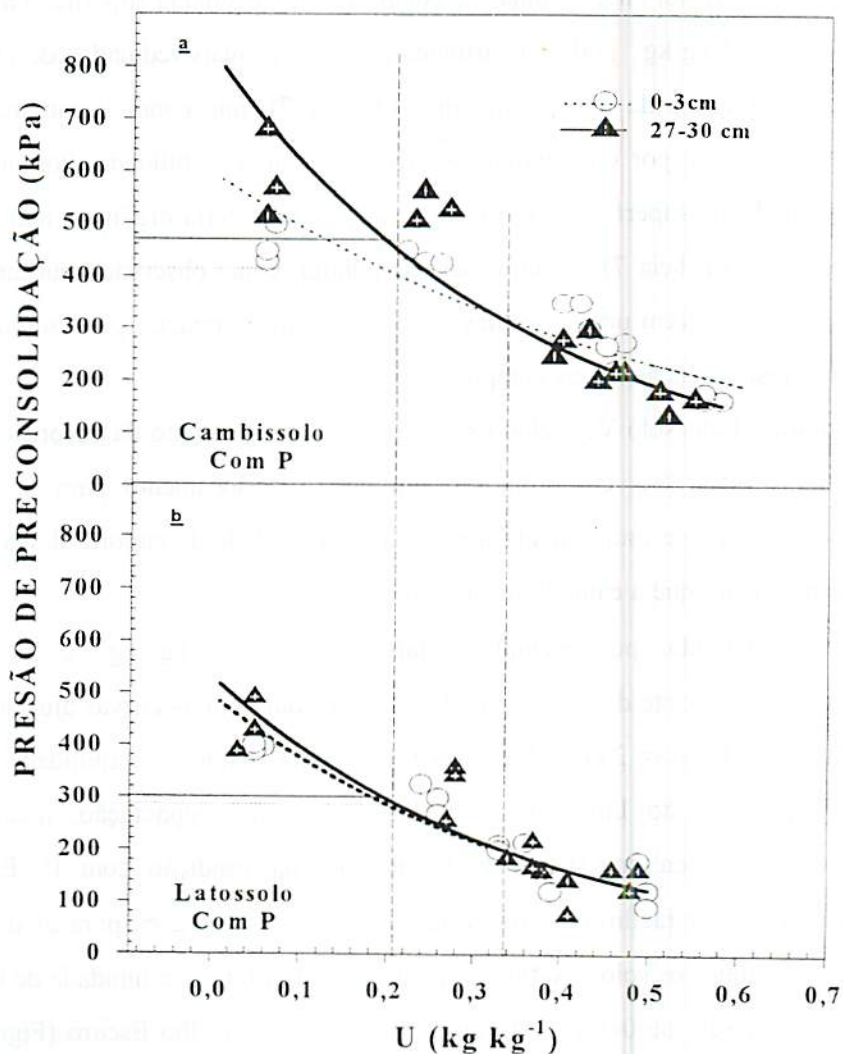


FIGURA 25. Pressões de preconsolidação (σ_p) em função da umidade (U) das camadas 0-3 e 27-30 cm na condição com P, do Cambissolo e do Latossolo Vermelho Escuro.

De acordo com a figura 25a, as menores σ_p verificadas na camada 0-3 cm até a umidade de aproximadamente $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$ conferem a esta camada uma menor capacidade de suporte de carga. A partir desta umidade, na qual verifica-se a intercessão das curvas, a camada de 27-30 cm passa a ser mais suscetível à compactação. A maior suscetibilidade à compactação da camada superficial até a umidade de $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$ pode ser atribuída aos valores mais reduzidos de D_s , e teores mais elevados de matéria orgânica (Tabela 7), que condicionam maior retenção de água, e por conseguinte favorecem à compressibilidade. Por outro lado, a camada subsuperficial, com baixos valores de matéria orgânica, maiores teores de argila (Tabela 7) e a influência de plintita, como observado durante a amostragem, favorecem uma estrutura em blocos mais compacta, possibilitando uma maior resistência as forças compressivas.

Para o Latossolo Vermelho Escuro (Figura 25b), o efeito da adsorção de fósforo na camada 0-3 cm promoveu um ligeiro deslocamento para baixo, permitindo inferir que esta camada apresenta a capacidade de suporte de carga ligeiramente menor que a camada subsuperficial.

Considerando, por exemplo a umidade de $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$ e as σ_p correspondente ao ponto de intercessão da perpendicular com as curvas ajustadas em cada caso (Figuras 25a e 25b), verifica-se uma maior suscetibilidade da camada superficial do Latossolo Vermelho Escuro à compactação, quando comparada à camada superficial do Cambissolo na condição com P. Esta observação pode ser facilmente visualizada quando se estima a σ_p para as duas camadas, em ambos os solos. Assim, do ponto de vista prático, à umidade de $0,2 \text{ kg kg}^{-1}$ nas camadas de 0-3 e 27-30 cm do Latossolo Vermelho Escuro (Figura 25b) este solo suporta uma pressão de aproximadamente 300 e 320 MPa, respectivamente. Já no Cambissolo este teor de umidade corresponde a 400 MPa para 0-3 cm e 420 para 27-30 cm. Isto significa que o cálculo da pressão a ser

aplicada por qualquer equipamento agrícola durante uma operação motomecanizada para o Cambissolo, para as condições destes estudo, não se aplica ao Latossolo Vermelho Escuro, pois poderá causar deformações plásticas não recuperáveis a este.

As σ_p do Latossolo Vermelho Escuro diminuíram com o aumento da umidade tanto na condição com e sem P em ambas as camadas (Figuras 26a e 26b), concordando com Larson e Gupta (1980), Dias Junior (1994) e Kondo (1998). É notório o deslocamento para baixo da curvas ajustadas da $\sigma_p = f(U)$ da condição com P, em ambas as camadas. Este deslocamento implica em menores σ_p , e mostra a redução na capacidade de suporte de carga deste solo quando submetido a adubação fosfatada à sua capacidade máxima de adsorção de P. A redução da σ_p para o material de solo que recebeu P, é atribuída a alta afinidade deste solo com o fosfato, a qual aumenta a densidade de cargas líquidas negativas na superfície do colóide com o abaixamento do PCZ, favorecendo a dispersão de agregados neste solo.

Na camada de 0-3 cm (Figura 26a), percebe-se uma redução gradativa na intensidade do efeito da adsorção de P com o aumento da umidade, sugerindo que a partir de uma determina umidade, onde provavelmente as curvas venham a se interceptar, ocorra uma parcial ou total inexistência do efeito do P na compressibilidade deste solo, que passa a ser influenciada apenas pelos altos teores de umidade.

A menor resposta do Cambissolo a adsorção de P (Figuras 27a e 27b), quando comparado ao Latossolo Vermelho Escuro (Figuras 26a e 26b), se deve aos baixos teores de óxidos e a mineralogia caulinitica (Tabela 1), que condicionou a uma menor adsorção de (Tabela A1) e provavelmente uma menor dispersão.

Com relação aos limites de consistência do solo, as figuras 26a, 26b, 27a e 27b permitem verificar um deslocamento destes, na condição com P, para valores mais elevados de umidade. Isto implica em menores σ_p e por conseguinte, menor capacidade de suporte de carga dos solos.

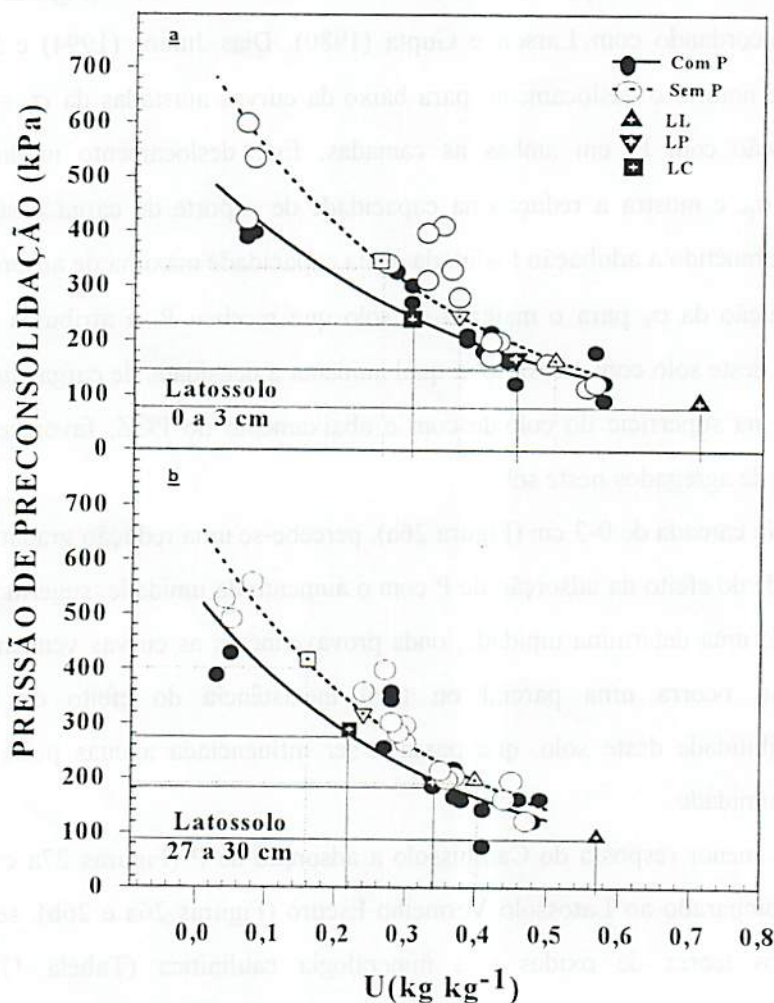


FIGURA 26. Pressões de preconsolidação (σ_p) em função da umidade (U) das condições com e sem P do Latossolo Vermelho Escuro, nas camadas de 0-3 e 27-30 cm.

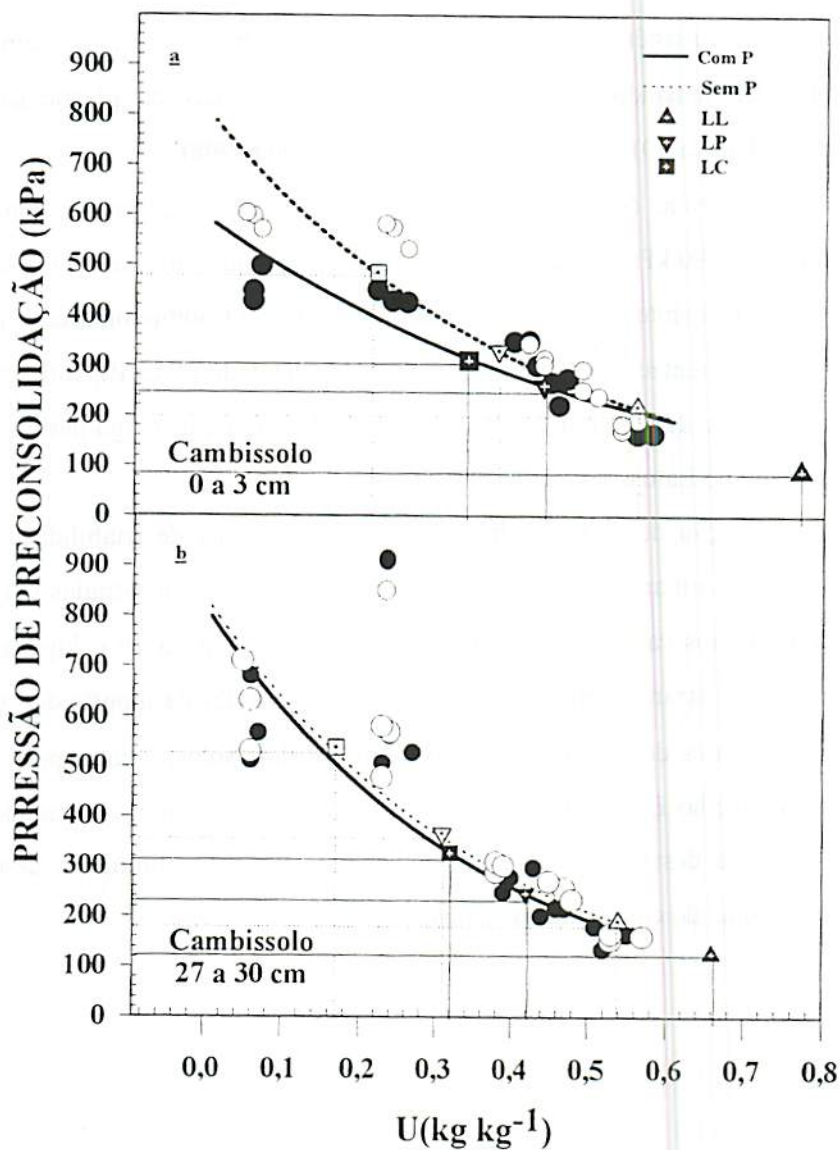


FIGURA 27. Pressões de preconsolidação (σ_p) em função da umidade (U) das condições com e sem P, do Cambissolo, nas camadas de 0-3 e 27-30 cm

Para que do ponto de vista do manejo perceba-se melhor o efeito do fósforo na capacidade de suporte de carga destes solos, estimou-se as σ_p para cada limite de consistência no tratamento com e sem P em ambas as camadas estudadas, determinando-se a variação das σ_p nas zonas de plasticidade e friabilidade (Tabela 10), conforme sugerido por Kondo (1998).

Desta forma, com base na tabela 10, os valores de $\Delta\sigma_p$ da zona de plasticidade 80 e 90 kPa no Latossolo Vermelho Escuro nas camadas de 0-3 e 27-30 cm, respectivamente na condição com P, e 120 kPa no Cambissolo, na camada de 27-30 cm referente as σ_p da nova zona de plasticidade ($\Delta\sigma_p ZP$), ratificam o efeito da adsorção de P na redução da capacidade de suporte de carga deste solos, principalmente no Latossolo Vermelho Escuro.

A adsorção de fósforo também influenciou a zona de friabilidade. Na condição com P, em ambas as camadas, os menores valores encontrados para as $\Delta\sigma_p$ em relação aos valores de $\Delta\sigma_p$ da condição sem P (Tabela 10 e Figura 28) dos dois solos mostraram uma redução nas suas capacidades de suporte de carga. Os menores valores de $\Delta\sigma_p$ da camada 0-3 cm nos dois solos, e em especial no Latossolo Vermelho Escuro vem mostrar mais uma vez a menor capacidade de suporte de carga desta camada, assim como, a maior susceptibilidade desta à compactação quando comparada a camada de 27-30 cm.

TABELA 10. Comparação das pressões de preconsolidação (σ_p), obtidas pelas equações de regressões a partir do modelo exponencial ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) em função dos limites de consistência e variação da σ_p da zona de friabilidade ($\Delta\sigma_{pZP}$) de plasticidade ($\Delta\sigma_{pZP}$) do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico nas camadas de 0-3 e 27-30 cm nas condições com e sem fósforo

Camada	Condição	Limites de Consistência			Δ_{UZP}	Parâmetros do modelo		R^2	$\sigma_p = f(\text{Consistência})$				
		LL	LP	LC		Intercepto (a)	Inclinação (b)		σ_{pLL}	σ_{pLP}	σ_{pLC}	$\Delta\sigma_{pZP}$	$\Delta\sigma_{pZP}$
cm		kg kg ⁻¹							σ_p (kPa)				
Cambissolo													
0-3	Sem P	0,56	0,38	0,22	0,16	2,91	-1,02	0,87	218	330	485	155	112
	Com P	0,76	0,43	0,34	0,09	2,77	-0,81	0,80	143	264	311	47	121
27-30	Sem P	0,54	0,30	0,16	0,14	2,93	-1,20	0,90	191	366	538	172	175
	Com P	0,65	0,42	0,32	0,10	2,91	-1,24	0,86	127	247	327	80	120
Latossolo Vermelho Escuro													
0-3	Sem P	0,44	0,32	0,22	0,10	2,85	-1,43	0,81	166	247	343	96	81
	Com P	0,62	0,39	0,26	0,13	2,70	-1,19	0,83	92	172	245	73	80
27-30	Sem P	0,40	0,24	0,16	0,08	2,83	-1,34	0,90	197	318	417	90	121
	Com P	0,57	0,34	0,22	0,12	2,73	-1,26	0,72	110	200	283	83	90

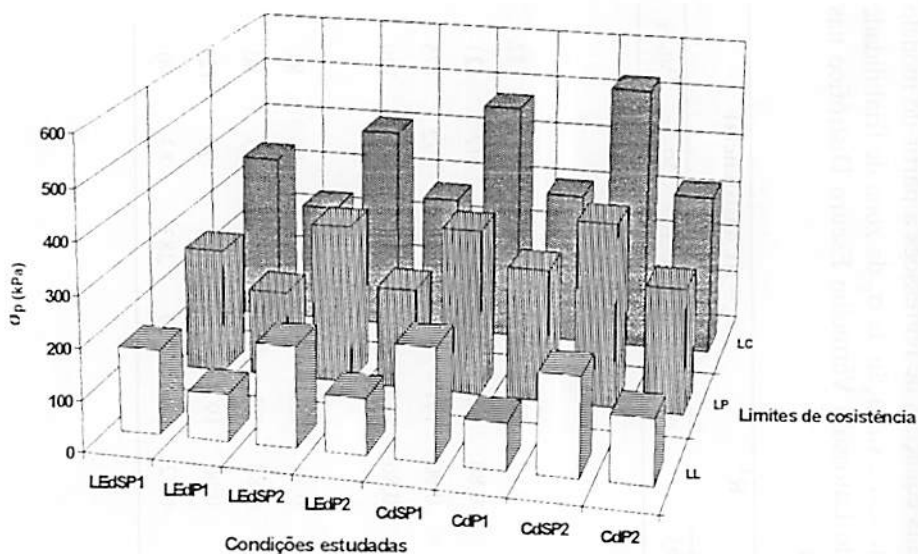


FIGURA 28. Pressões de preconsolidação (σ_p) em função dos limites de consistência do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro nas camadas de 0-3 e 27-30 cm, nas condições com e sem fósforo.

As curvas de compressão, os índices de compressão e as pressões de preconsolidação obtidas em função da umidade, evidenciaram a influência do efeito da adsorção de fósforo na compressibilidade dos solos estudados. Contudo, para verificar a o grau de significação deste efeito, analisaram-se os dados de pressão de preconsolidação pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Dos fatores analisados (solo, camada, umidade e fósforo) apenas a camada não foi significativa. As médias das pressões de preconsolidação dos solos dentro das condições com e sem P são apresentadas na tabela 11.

TABELA 11. Médias¹ de pressões de preconsolidação dos solos estudados em função das condições com e sem P, e das tensões e umidades equilibradas

Umidades equilibradas Sucção/Peso	Condição			
	Com P		Sem P	
	Cambissolo	Latossolo	Cambissolo	Latossolo
	kPa			
0,002 MPa	165,00 aA	139,83 aA	171,50 aA	144,83 bA
0,010 MPa	233,00 aA	146,00 bB	260,66 aA	196,83 bA
1,500 MPa	303,88 aA	198,83 bB	310,16 aA	310,00 bA
0,250 kg kg ⁻¹	483,66 aB	309,50 bB	552,66 aA	333,83 bA
0,050 kg kg ⁻¹	522,16 aB	414,83 bB	607,32 aA	521,00 bA

C.V. = 12,21 % D.M.S. (5%) = 44,32 kPa

¹Comparam-se letras minúsculas entre solos na mesma condição de P e letras maiúsculas entre condição de P no mesmo solo. Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Nas amostras com e sem fósforo, as σ_p do Cambissolo foram estatisticamente superiores as médias do Latossolo Vermelho Escuro (Tabela 11). Estes resultados são explicados pela estrutura em blocos, mineralogia caulinitica e os elevados teores de argila extraídos pelo ADA e ADP do Cambissolo (Tabela 7). Por outro lado, a estrutura granular e mineralogia oxidica do Latossolo Vermelho Escuro favoreceram uma maior adsorção de fósforo, aumentando o efeito dispersivo que resultou em σ_p mais baixas.

As pressões de preconsolidação (σ_p), calculadas para a zona de plasticidade e friabilidade da condição com P nos dois solos estudados como mostra a tabela 10, sugerem uma nova reflexão sobre o papel e a utilização do fósforo nas práticas agrícolas, principalmente em solos de clima tropical. Os resultados aqui encontrados, são apenas sugestivos, cabendo a outros estudos um

maior detalhamento, onde se pesquise, não apenas o efeito da capacidade máxima da adsorção deste elemento nos atributos do solo, mas que, se busque um parcelamento das concentrações deste elemento ao nível de campo, e os efeitos causados sob os diferentes sistemas de manejo.

5 CONCLUSÕES

A adsorção de fósforo diminuiu a estabilidade de agregados estáveis em água nas camadas 0-3 e 27-30 cm; alterou a proporção das frações granulométricas, baixando o índice de floculação dos dois solos estudados, em suas respectivas camadas; promoveu um incremento dos limites de consistência do solo, diminuindo a região de friabilidade e aumentando a região plástica, exclusivamente, no Cambissolo distrófico; promoveu um deslocamento mais acentuado nas curvas de compressão para baixo e para a esquerda nos dois solos e nas duas camadas estudadas, refletindo em menores pressões de preconsolidação (σ_p); promoveu um aumento nos índices de compressão, predispondo os solos estudados na condição com P à uma maior suscetibilidade a compactação.

Dos solos estudados, o Latossolo Vermelho Escuro Distrófico foi o que apresentou maiores índices de compressão, sendo portanto mais suscetível à compactação.

As pressões de preconsolidação (σ_p) plotadas em função da umidade (U), seguiram o modelo $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$ proposto por Dias Junior (1994), e forneceram as seguintes equações:

$$\text{Cambissolo (0-3 cm com P)} \quad \sigma_p = 10^{(2,77 - 0,81U)} \quad R^2 = 0,80;$$

$$\text{Cambissolo (0-3 cm sem P)} \quad \sigma_p = 10^{(2,91 - 2,022U)} \quad R^2 = 0,87;$$

$$\text{Cambissolo (27-30 cm com P)} \quad \sigma_p = 10^{(2,92 - 1,25U)} \quad R^2 = 0,86;$$

$$\text{Cambissolo (27-30 cm sem P)} \quad \sigma_p = 10^{(2,93 - 1,20U)} \quad R^2 = 0,90;$$

Latossolo Vermelho Escuro (0-3 cm com P) $\sigma_p = 10^{(2.71 - 1.25U)}$ $R^2 = 0,83$;

Latossolo Vermelho Escuro (0-3 cm sem P) $\sigma_p = 10^{(2.86 - 1.46U)}$ $R^2 = 0,81$;

Latossolo Vermelho Escuro (27-30 cm com P) $\sigma_p = 10^{(2.76 - 1.39U)}$
 $R^2 = 0,90$;

Latossolo Vermelho Escuro (27-30 cm sem P) $\sigma_p = 10^{(2.83 - 1.35U)}$
 $R^2 = 0,90$.

As curvas obtidas pelos modelos de compressibilidade dos dois solos nas duas camadas tratadas com fósforo, deslocaram-se para baixo, refletindo em σ_p mais baixas e menor capacidade de suporte de carga.

As duas profundidades estudadas (0-3 e 27-30cm) do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico na condição com P apresentaram menores pressões de preconsolidação que as camadas do Cambissolo distrófico, evidenciando a maior suscetibilidade deste solo à compactação.

O fósforo promoveu o deslocamento do limites de consistência do solos estudados para valores mais elevados de umidades, redefinindo as zonas de plasticidade e friabilidade, as quais passaram a oferecer um menor suporte de carga .

O Latossolo Vermelho Escuro, apesar de apresentar maiores teores de matéria orgânica, índice de floculação, maior estabilidade de agregados e menor ADA, é mais suscetível à compactação do que o Cambissolo distrófico devido a sua mineralogia gibbissítica e estrutura granular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHÁ, L. P. **Latossolo Vermelho-Amarelo de Tabuleiro no Espírito Santo: formação, características e classificação.** Recife: UFPE, 1976. 113p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- AFIF, E.; BARRON, V.; TORRENT, J. Organic matter delays but not prevent phosphate sorption by cerrado soil from Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v.159, n.3, p.207-211, March. 1995.
- AHMED, S.; SWINDALE, L.D.; EL-SWAIFY, S.A. Effects of adsorbed cations on physical properties of tropical red earths and tropical black earths. I- Plastic Limit, percentage of stable aggregates and hidraulic conductivity. **Journal of Soil Science**, Oxford, England, v.20, n.2, p.68-255, September, 1969.
- ALMEIDA, J.; RESENDE, M. Considerações sobre o manejo de solos rasos desenvolvidos de rochas pelíticas no Estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n.128, p.19-26, agosto, 1985.
- ALVARES, V.H; FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegeetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, p.49-55, 1990.
- BAHIA FILHO, A.F.C. **Índice de disponibilidade de fósforo em latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas.** Viçosa: UFV, 1982. 179p. (Tese - Doutorado em Fitotécnia).
- BALLESTERO, S.D. **Efeito da semeadura de milho em quatro níveis de umidade na compactação de um Latossolo Vermelho Escuro.** Piracicaba: ESALQ/USP, 1992. 89p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. Soil physics. 4 ed. New York: John Wiley, 1972. 498p.**
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A.,(ed). Methods of soil analysis. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v. 1, p.363-75.**
- BOWEN, H.D. Alleviating mechanical Impedance. In; ARKIN, G.F.; TAYLOR, H. M. Modifying the Root Environment to Reduce Crop Stress. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981, Cap. 2, p.21-57.**
- BOWLES, J. A. Engineering properties of soils and their measurements. Third edition. McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.**
- BRADFORD, J.M., GUPTA, S.C. Compressibility. In: KLUTE A. (ed.) Methods of soil analysis. Part 1, 2nd ed., Agron. Monogr., 9, ASA. Madison, WI, p.279-492, 1986.**
- BRAGA. J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de solo em extratos de solo e material vegetal. Revista Ceres, Viçosa, v.21, n.113, p.73-85, janeiro/fevereiro,1974.**
- BRASIL. Ministério das Minas e energia. Projeto Radambrasil, folhas SF 23/24, Rio de Janeiro/Vitória. Rio de Janeiro, 1983.775p**
- BRUSSAARD, L.; VAN FAASSEN,H.G. Effects of Compaction on Soil Biota and Soil Biological Processes. In: Soane B.D.;VAN OUWERKERK, Soil Compaction in crop production. Amsterdam: Elsevier, 1994, Cap.6, p. 215-235.**
- CAMPBELL, D.J. Determination na Use of Soil Bulk density in Relation to Soil Compaction. In: Soane B.D.;VAN OUWERKERK, Soil Compaction in crop production. Amsterdam: Elsevier, 1994, Cap.6, p.113-139.**
- CAPUTO, H.P. Plasticidade e consistência dos solos. In: CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. 3ªed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 1977. p. 60-69**
- CARPENEDO, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre: UFRGS, 1994. 106p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).**

- CARVALHO, A. F. de.** Emprego da agitação horizontal na avaliação da estabilidade de agregados de cinco solos da Região Sudeste. Viçosa: UFV, 1991. 73p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- CASAGRANDE, A .** The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: CONF. ON SOIL MECH. AND FOUND. ENC., PROC. Of the ICSMFE. Cambridge, v.3, p.60-64, March, 1936.
- CHANCELLOR, W.J.** Compaction of soil by agricultural equipment. Division of Agritural Society of California, 53 p, 1981(Bulletin)
- COHRON, G.T.** The causing of soil compaction. In: BARNES, K.K. Compaction of agricultural soil. S. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1971. Cap. 4. p.24 -106.
- CULLEY, J. L. B.; LARSON, W. E.** Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.51, n.3, p.562-567, May/June, 1987.
- CURI, N.** Litosequence and toposequence of oxisols from Goiás and Minas Gerais States, Brazil. West Lafayette: Purdue University, 1983. 158 p. (Tese - PhD).
- CURI, N.; CHAGAS, C. da S.; GIAROLA, N.F.B.** Distinção de ambientes agrícolas e relação solo - pastagens nos Campos da Mantiqueira, MG. In: CARVALHO, M.M; EVANGELISTA, A.R.; CURI, N. DESENVOLVIMENTO DE PASTAGEM NA ZONA FISIAGRÁFICA CAMPOS DAS VERTENTES, MG. Lavras/Coronel Pacheco: Embrapa - CNPGL, 1994, Parte I, p.21-44.
- DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L.** Porosity. In: KLUTE, A. (ed.). Methods of soil analysis. Madison: American Society Agronomy, 1986. v.1, p.545-566.
- DAY, P.R.** Particle fractionation and particle size analysis. In: BLACK, C. A . Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v.1, p.545-66.
- DEDECEK, R.A.** Adinâmica dos solos em áreas degradadas. In: Simpósio nacional sobre recuperação de Áreas Degradadas, 25 a 29 de outubro de 1992. Anais... 520p

- DIAS JUNIOR, M. de S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)**
- DIAS JUNIOR, M. de S. Uso da história de tensão e da variação da umidade como instrumentos para evitar a compactação adicional do solo. In: WORKSHOP SOBRE A AVALIAÇÃO E MANEJO DE RECURSO NATURAIS EM ÁREA DE EXPLORAÇÃO DE CANA DA AÇÚCAR, 1. Aracaju, 1997. Palestras. Aracaju: Embrapa-CPATC, 1997, p.67-81**
- DIAS JUNIOR, M. de S., MIRANDA, E.E.V.de. Metodologia para determinação do limite de contração modificada. Ciência e Agrotecnologia. (no prelo).**
- DIAS JÚNIOR, M. de S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil technology, v.8. p.139-151, 1995.**
- DIAS JÚNIOR, M. de S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 20, n.2, p.175-182, mai/ago, 1996.**
- DIAS JUNIOR, M. S. Notas de física do solo. Lavras: DCS. UFLA., 1996.167p.**
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997, 212p.**
- FERREIRA, M. M. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos brasileiros. Viçosa: UFV, 1988. 79p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).**
- GIAROLA, N.F.B. Levantamento pedológico, perdas de solo e aptidão agrícola das terras na região de influência do reservatório de Itutinga/Camargos (MG). Lavras: UFLA, 1994. 226p. (Dissertação-Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).**
- GILL, R.W.; REAVES, C.A. Relationships of Atterberg limits and cation-exchange capacity to some physical properties of soil. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 21, n.3. p.94-491, May/June, 1957.**

- GILMAN, G.P. The influence of net charge on water dispersible clay and soberb sulphate. *Austrália Journal Soil Research*, v.12, p.173-176, 1974.
- GUERIF J. Effects of Compaion on Soil Strenght Parameters. In: Soane B.D.;VAN OUWERKERK, **Soil Compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994, Cap.9, p. 191-213.
- GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Advances in Soil Science*, London, v.6, p.65-100, 1987.
- GUPTA, S.C.; HADAS, A.; SHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compaction.. 137- 152. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOOHEES, W. B.; GUPTA, S.C., (eds.) **Mechanical and related process in structured agriccultural soils**. The Netherlands Kluwer Academic Publishes, p.137-152, 1989.
- HILLEL, D. **Introduction to soil physic**. San Diego: Academic, 1982. 364p.
- HINGSTON, F.J.; POSNER A.M.; QUIRK. J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. II: Desorption of anions from the hydrous oxide surfaces. *Journal of Soil Science*, Oxford,v.25, n.1 p.16-26, march, 1974.
- HINGSTON, F.J.; POSNER, A . M. ; QUIRQ, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I The role of proton in determing adsorption envelopes. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.23, n.2, p.177-192, June, 1972.
- HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **Introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 773p.
- HORN, R. Compressibility of arable land. *Catena Sup*. V.11, p.53-71, 1988.
- HORTON, H.; ANKENY, M.D.;ALLMARAS,R.R. Effects of Compaction on Soil Hidraulic Properties. In: Soane B.D.;VAN OUWERKERK, **Soil Compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994, Cap.7, p. 141-165.
- KAMPF, N.; SCHWERTMANN, U. The 5M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clay Clay Minerals*, Ottawa, v.30, n:6, p.401-408, 1982.

- KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis; physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. V.1, p.499-510.
- KENG, J.C.; UEHARA, G. Chemistry, mineralogy and taxonomy of oxisols and Ultisols. **Soil and Crop Science Society of Florida**. Flórida, v.31, p.119-126, 1974.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979. 269p.
- KONDO, M.K. **Compressibilidade de três latossolos sob diferentes usos**. Lavras: UFLA, 1998. 105p. (Dissertação- Mestrado em solos e Nutrição de Plantas)
- KOOISTRA, J.M.; TOVEY, N.K. Effects of Compaction on Soil Microstructure. In: Soane B.D.;VAN OUWERKERK, **Soil Compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994, Cap.5, p. 91-111.
- KUO, S.; LOTSE, E. G. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by lake sediments. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.38, n.1, p.50-54, January/February, 1974.
- LARSON, W. E. ; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soil from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of American Journal**. Madison, v.44, n.6, p.1127-1132, November/December, 1980.
- LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W. B. and GUPTA, S.C. **Mechanics and related processes in structured agricultural soils**. the Netherlands, Kluwer Academic Published, 1989. 273p. (Nato Applied Science, 172)
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.450-457, 1980.
- LEBERT, M. ; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, v.19, p.275-286, mês 1991.

- LEONARDS, G.A. Foudation engineering. McGraw-Hill, Book Company, Inc., New York, 1962, 1136p.
- LIMA, J. M. de. Relation between phophate sortption and agregation in oxisols from Brazil. Michigan State University, 1995. 87p. (Ph.D-Dissertation).
- MACEDO, V.G.M. Compressibilidade de um Podzólico Vermelho Escuro fisicamente degradado e recuperado. Porto Alegre: UFRGS, 1993. (Dissertação- Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MATTOS, C. M. Propriedades físicas de solos cauliniticos coesos do município do Aracruz, ES. Piracicaba: ESALQ/USP, 1978. 73p. (Dsissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MAZIERO, J.V.G. Compactação do solo por patinagem da roda motriz de um trator agrícola. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993. 105p. (Dissertação- Mestrado em Máquinas Agrícolas)
- MEHRA, O . P.; JACKSON, M. L. Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. Clays Clay Minerals, Clarkson, v.7, n.2, p.317-327, 1960.
- MINAS GERAIS. Secretaria de Ciência e Tecnologia/Instituto de Geociências Aplicadas. Microrregiões homogêneas. Belo Horizonte, 1985.
- MORAES, M. H. Efeito da compactação em algumas propriedade físicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja (*Glycine max* (L) MERRILL), Piracicaba: ESALQ/USP. 1988. 106p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- OLIVEIRA, M. Comportamento de características e propriedades físicas de um Podzólico Vermelho-Amarelo sob condições de pasto natural e cultivo na região de Lavras, MG. Lavras: ESAL, 1979. 136p (Dissertação- Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- OLSEN, R.B.; WATANABE, F.S. A method of determine a phosphorus adsorption maximun of soils as mesured by the Langmuir isotherm. Soil Science Society of America, Madison, v.21, n., p.144-149, 1957.

- PACHECO, A. A. R. C. ; DIAS JUNIOR, M. de . S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos em adobe. *Ciência e Prática*. Lavras, v.14, n.2, p. 176-190, maio/ago. 1990.
- PARFIT, R.L Reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite.. *Journal Soil Science*, Oxford, v.40, n.2, p.59-369, June,1989.
- PARFIT, R.L.; ATKINSON, R.J.; SMART R.S.C. The machanisms of phosphate fixation by iron oxides. *Soil Science Society of America Journal*. Madison, v.39, n.5, p.837-841, September/October, 1975.
- RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. *Jounal Terramechanics*. v.19, p.235-242, 1983.
- RESENDE, M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil. West Lafayette: Purdue University, 1976. 237p, (PhD - thesis).
- RESENDE, M. *Pedologia*. Viçosa: UFV, 1982. 100p.
- RIBEIRO, S.A. Efeitos da colheita mecânica na produção de capim elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum), Piracicaba: ESALQ/USP, 1987. 64p. (Dissertação - Mestrado em. Solos e Nutrição de Plantas).
- SANTOS, M.C.D., MERMUT, A .R.; RIBEIRO, M.R. Submicroscopy of clay microaggregates in Oxisol from Pernambuco, Brazil. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.53, n.6, p.1895-1901, 1989.
- SAWHNEY, B.L. Charge characteristics of soils as affected by phosphate sortion. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.38, p.159-160, 1974.
- SCHWERTMAN, U. ; KAMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. *Soil Science*, Baltimore. v. 139, p.344-350, 1985.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraktion mit ammoniumoxalat-losung. *Zeitschrift fuer pflanzenernaehrung: Bondenk*, v.105, n.2, p.195-202, 1964.

- SCROPP J. Analysis of time dependent chemical processes in soils. *Journal Environmental Quality*. v.15, p205-213, 1986.
- SILVA, L. F. da. *Solos Tropicais: Aspectos pedológicos, ecológicos e de manejo*. São Paulo: terra Brasilis, 1996.
- SOWERS, G. W. 1986. Consistency. In: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis*. Part. 1. 2nd ed. Agronomy Monograph 9, ASA. Madison, WI. p.391-399, 1986.
- SOWERS, G.F. Consistency. In: BLACK, C.A. *Methods of soil analysis physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling*. part 1. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.391-399.
- SPOSITO, G.. Surface reactions in natural and aqueous colloidal systems. *Chimia* , v.43, p.169-176, 1989a.
- STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B.C. In: Soane B.D.;VAN OUWERKERK, *Soil Compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994, Cap.8, p. 167-189.
- STONE, J. A ; LARSON, W. E. Rebound of five one dimensionally compressed unsaturated granular soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, n.4, p. 819-822, July/August, 1980.
- SUMNER, M.E. The electrical double layer and clay dispersion. In: SUMNER, M.E; STEWART, B.A. (eds.). *Soil crusting: chemical and physical processes*. Boca Raton: Fla. Lewers, 1992, 372p.
- TISDAL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. *Journal soil science*, oxford, v. 33, p.141-163, 1982
- UEHARA, G. ; GILMAN, G.P. Charge characteristics of soil with variable and permanent charge minerals: I Theory. v.44, n.2 p.250-252, March/April, 1980.
- VAN RAIJ, B. ; PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the Tropics. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.36, n.4, p.587-593, July/August, 1972.

VAN RAIJ, B. Determinação de cargas elétricas em solos. *Bragantia*, Campinas, v.7, n.32, p.171-83, 1973b.

VASCONCELLOS, A .C. Fósforo em dois latossolos do estado de Mato Grosso: adsorção, dessorção e crescimento vegetal. Viçosa: UFV, 1974. 103p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).

VEITH, J.A.; SPOSITO, G. On the use of the Langmuir equation in the interpretation of adsorption phenomena. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 41, n.4, p.697-702, July/August, 1977.

VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Brasília: Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7).

WILLET, I.R.; CHARTRES, C.J.; NGUYEN, T.T. Migration of phosphate into aggregated particles of ferrihydrite. *Journal Soil Science*, Oxford, v.39, p.275-282, 1988.



ANEXOS

LISTA DE TABELAS

TABELA	Página
ANEXO A	
A1 Concentrações de P (KH_2PO_4) para as respectivas quantidades de solo (g) dos parâmetros estudados em função da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico nas profundidade de 0-3 e 27-30 cm	101
A2 Umidade e densidade inicial (D_{s_i}) do ensaio de compressão do Cambissolo para a condição com e sem P nas camadas de 0-3 e 27-30 cm.....	102
A3 Umidade e densidade inicial (D_{s_i}) do ensaio de compressão do Latossolo Vermelho Escuro para a condição com e sem P nas camadas de 0 -3 e 27-30 cm.....	103
A4 Análise de variância das equações de regressão, coeficientes de determinação, erro padrão e ajuste do teste, obtidos a partir do modelo $10^{(a-bU)}$ do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro distrófico nas condições com e sem fósforo ao nível de 5% de significância.....	104

TABELA A1. Concentrações de P (KH_2PO_4) para as respectivas quantidades de solo (g) dos parâmetros estudados em função da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico nas profundidade de 0-3 e 27-30 cm

Camada	Condição	Equação	K	CMAP	Ensaio de compressibilidade		Parâmetros físicos estudados		
					P por cilindro	P total	Consistência	Textura	Agregado
							massa de solo (g)		
Cm			mg kg ⁻¹		n° = 15	500	10	25	
Fósforo (mg kg ⁻¹)									
Cambissolo									
0-3	Sem fósforo	$Y = 0,001065x + 0,00185$ $R^2 = 0,994$	0,57	939	83,58	1.253,72	440,00	8,80	22,00
27-30	Sem fósforo	$Y = 0,000893x + 0,00294$ $R^2 = 0,997$	0,31	1.119	119,70	1.795,57	624,78	12,50	31,24
Latossolo Vermelho Escuro									
0-3	Sem fósforo	$Y = 0,000769x + 0,00103$ $R^2 = 0,995$	0,74	1.299	149,24	2.238,67	838,69	16,76	41,90
27-30	Sem fósforo	$Y = 0,000641x + 0,000482$ $R^2 = 0,996$	1,33	1.559	253,69	3.805,30	1218,85	23,22	59,83

¹ A fonte de P usada foi KH_2PO_4 a qual foi corrigida em função da umidade e densidade do solo, considerando suas respectivas profundidades e as equações da CMAP.

² Anéis utilizados para determinação da macroporosidade, microporosidade, volume total de poro (VTP), umidade atual e umidade de saturação receberam as mesmas concentrações de P que os da compressibilidade.

^{*} n = número de cilindro utilizado em cada condição estudada.

TABELA A2. Umidade e densidade inicial (D_{s_i}) do ensaio de compressão do Cambissolo para a condição com e sem P nas camadas de 0-3 e 27-30 cm

Sucções/umidade gravimétrica ¹		Parâmetros		
		Umidade	D_{s_i}	D_{s_i} ²
MPa/kg kg ⁻¹		kg kg ⁻¹	Mg m ⁻³	
Com P (0-3 cm)				
0,002	Ma	0,57	0,98	0,98 ± 0,05
0,010	Ma	0,46	1,01	
1,5	Ma	0,42	1,05	
0,25	kg kg ⁻¹	0,24	0,95	
0,06	kg kg ⁻¹	0,06	0,93	
Sem P (0-3 cm)				
0,002	Ma	0,55	1,03	0,99 ± 0,05
0,010	Ma	0,50	1,04	
1,5	Ma	0,43	1,00	
0,25	kg kg ⁻¹	0,25	0,94	
0,06	kg kg ⁻¹	0,06	0,92	
Com P (27 - 30 cm)				
0,002	Ma	0,52	1,03	1,03 ± 0,03
0,010	Ma	0,46	1,08	
1,5	Ma	0,41	1,03	
0,25	kg kg ⁻¹	0,25	1,00	
0,06	kg kg ⁻¹	0,06	1,06	
Sem P (27 - 30 cm)				
0,002	Ma	0,54	1,04	1,07 ± 0,02
0,010	Ma	0,47	1,09	
1,5	Ma	0,38	1,07	
0,25	kg kg ⁻¹	0,23	1,05	
0,06	kg kg ⁻¹	0,06	1,08	

¹ Mpa: umidades equilibradas por sucção; kg kg⁻¹ : umidades equilibradas por peso

² Média de ± desvio padrão da média (n = 15)

TABELA A3. Umidade e densidade inicial (D_{s_i}) do ensaio de compressão do Latossolo Vermelho Escuro para a condição com e sem P nas camadas de 0-3 e 27-30 cm

Sucções/umidade gravimétrica ¹		Parâmetros		
		Umidade	D_{s_i}	D_{s_i} ²
MPa/kg kg ⁻¹		kg kg ⁻¹	Mg m ⁻³	
Com P (0-3 cm)				
0,002	Ma	0,50	0,98	0,99 ± 0,04
0,010	Ma	0,38	0,98	
1,5	Ma	0,34	1,00	
0,25	kg kg ⁻¹	0,25	1,07	
0,06	kg kg ⁻¹	0,05	0,96	
Sem P (0-3 cm)				
0,002	Ma	0,47	0,98	1,01 ± 0,04
0,010	Ma	0,36	0,96	
1,5	Ma	0,31	1,04	
0,25	kg kg ⁻¹	0,26	1,06	
0,06	kg kg ⁻¹	0,05	0,99	
Com P (27-30 cm)				
0,002	Ma	0,48	1,10	1,05 ± 0,04
0,010	Ma	0,40	1,01	
1,5	Ma	0,36	1,09	
0,25	kg kg ⁻¹	0,28	1,06	
0,06	kg kg ⁻¹	0,05	1,06	
Sem P (27-30 cm)				
0,002	Ma	0,46	1,04	1,06 ± 0,02
0,010	Ma	0,36	1,08	
1,5	Ma	0,30	1,04	
0,25	kg kg ⁻¹	0,26	1,07	
0,06	kg kg ⁻¹	0,06	1,06	

¹Ma: umidades equilibradas por sucção; kg kg⁻¹ : umidades equilibradas por peso

² Média de três repetições.

TABELA A4. Análise de variância das equações de regressão, coeficientes de determinação, erro padrão e ajuste do teste, obtidos a partir do modelo 10 ^(a · bU) do Cambissolo distrófico epiálico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico nas condições com e sem fósforo ao nível de 5% de significância.

Camada (cm)	Condição	Causas da variação						Parâmetros do modelo		R ²	R ² ajust.	Err. Pad.	Ajuste do teste
		Regressão		Resíduo		Total		a	b				
		G.L.	Q.M.	G.L.	Q.M.	G.L.	Q.M.						
Cambissolo													
0-3	Sem P	1	0,509	13	0,006	14	0,042	2,91	-1,02	0,87	0,86	0,077	0,999
	Com P	1	0,318	13	0,006	14	0,028	2,77	-0,81	0,80	0,79	0,077	0,999
27-30	Sem P	1	0,648	13	0,005	14	0,051	2,93	-1,20	0,90	0,89	0,074	1,000
	Com P	1	0,650	13	0,008	14	0,054	2,91	1,25	0,86	0,85	0,089	0,999
Latossolo Vermelho Escuro													
0-3	Sem P	1	0,590	13	0,010	14	0,052	2,85	-1,43	0,81	0,80	0,102	0,999
	Com P	1	0,466	13	0,007	14	0,040	2,70	-1,19	0,83	0,81	0,085	0,999
27-30	Sem P	1	0,476	13	0,004	14	0,038	2,83	-1,34	0,89	0,89	0,899	1,000
	Com P	1	0,531	13	0,016	14	0,053	2,73	-1,26	0,72	0,70	0,127	0,991

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
ANEXO B	
B1	Curvas de análise térmica diferencial da fração argila desferrificada das camadas 0-3 e 27-30 cm do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita... 107
B2	Difratogramas de Raios-X da fração argila desferrificada das camadas 0-3 e 27-30 cm do Cambissolo distrófico (e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico. Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita. Valores de d (espaçamento basal) em Ângstron..... 108
B3	Difratogramas de Raios-X da fração argila natural das camadas 0-3 e 27-30 cm do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico. Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita; Gt: Goethita; Qz: Quartzo. Valores de d (espaçamento basal) em Ângstron..... 109
B4	Difratogramas de Raios-X da fração argila de óxidos concentrado das camadas 0-3 e 27-30 cm do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico. Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita; Gt: Goethita; Qz: Quartzo; Na: Anatásio; Hm: Hematita. Valores de d (espaçamento basal) em Ângstron..... 110

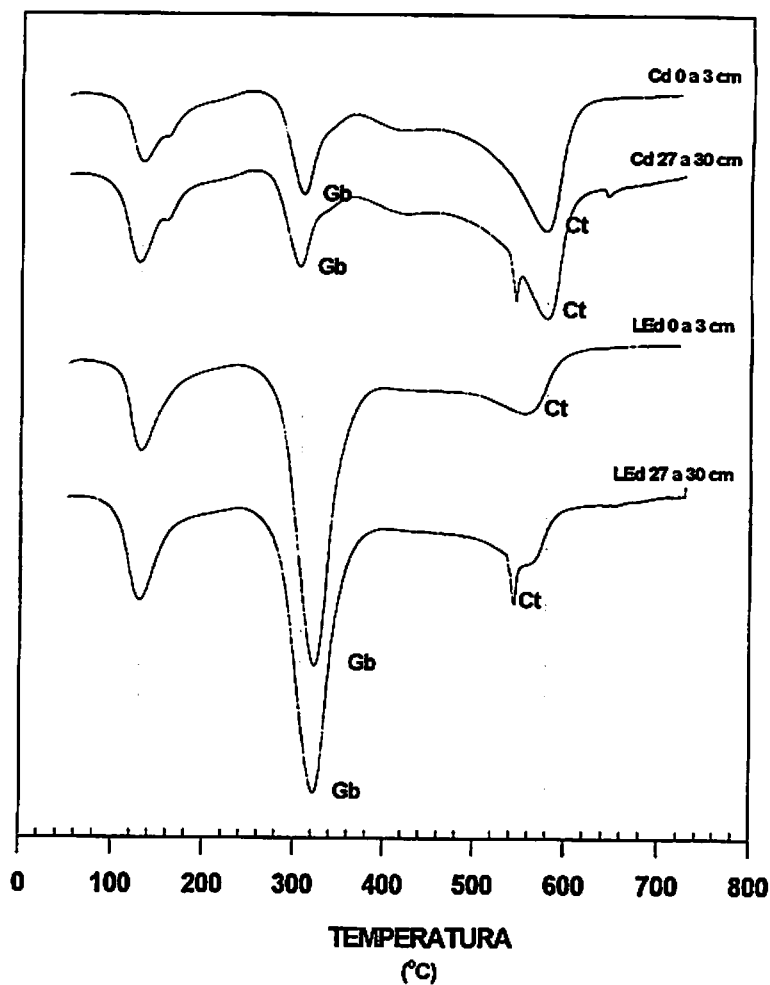


FIGURA B1. Curvas de análise térmica diferencial da fração argila desferrificada das camadas 0-3 cm e 27-30 cm do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita.

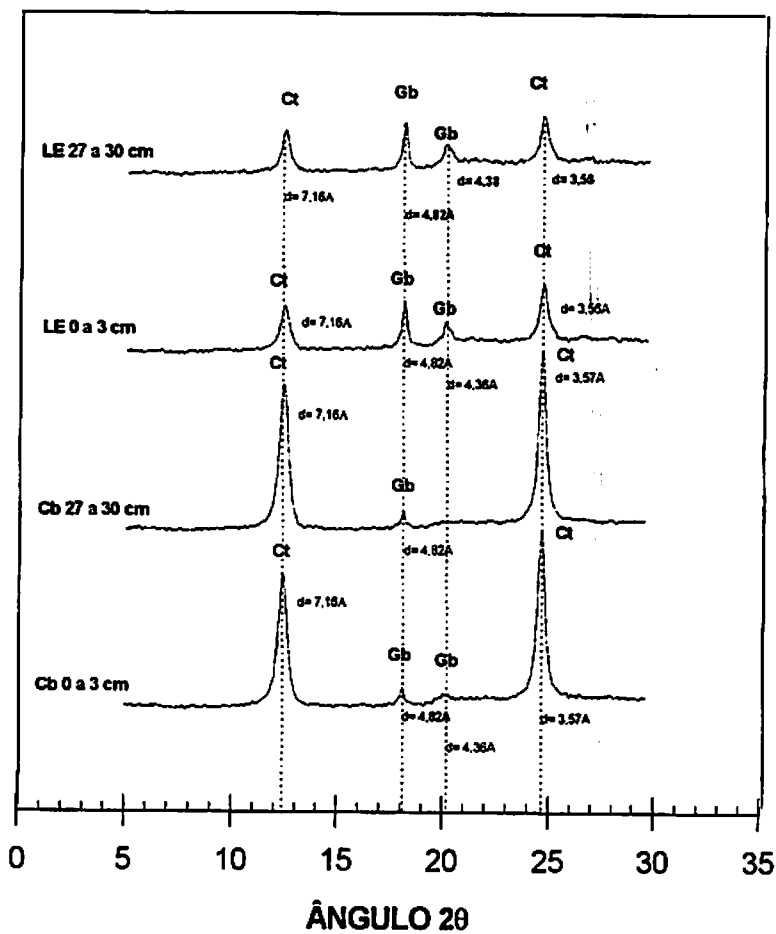


FIGURA B2. Difractogramas de Raios-X da fração argila desferrificada das camadas 0-3 cm e 27-30 cm do Cambissolo distrófico (e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico). Ct: Caulinite; Gb: Gibbsite. Valores de d (espaçamentobasal) em Ångstron.

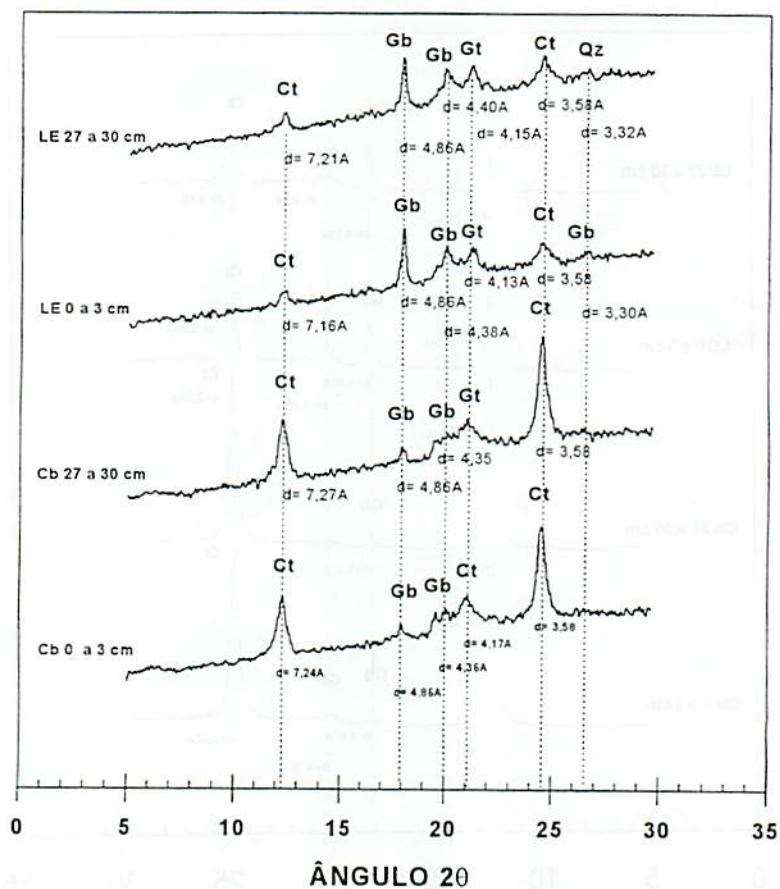


FIGURA B3. Difractogramas de Raios-X da fração argila natural das camadas 0-3 e 27-30 cm do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico. Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita; Gt: Goethita; Qz: Quartzo. Valores de d (espaçamento basal) em Ângstrom.

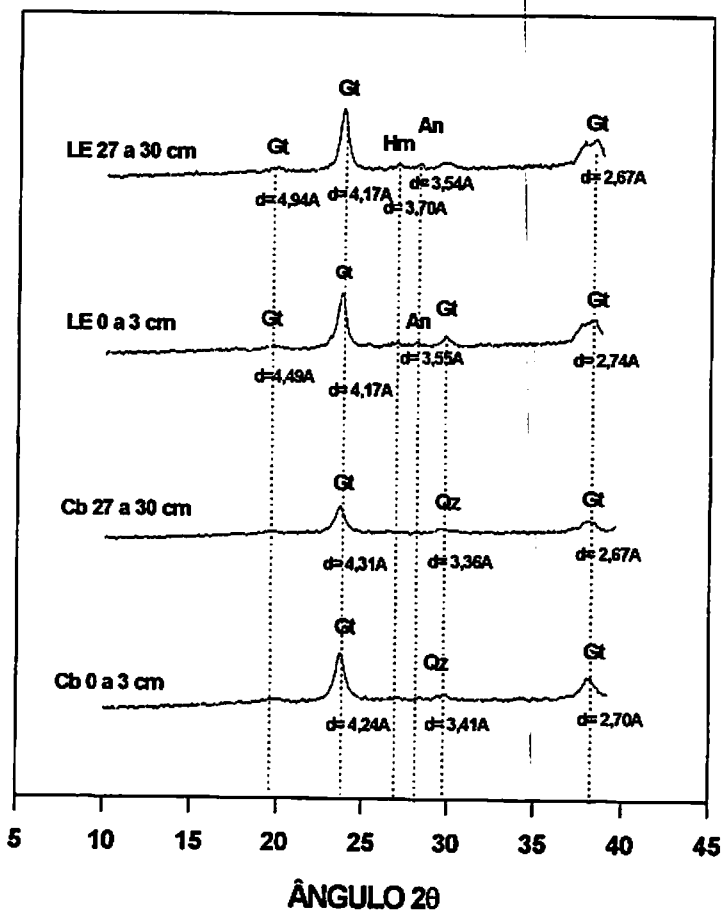


FIGURA B4. Difratomogramas de Raios-X da fração argila de óxidos concentrado das camadas 0-3 cm e 27-30 cm do Cambissolo distrófico e do Latossolo Vermelho Escuro Distrófico. Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita; Gt: Goethita; Qz: Quartzo; Na: Anatásio; Hm: Hematita. Valores de d (espaçamento basal) em Ângstrom.