

FLAVIO ALESSANDRO CRISPIM

COMPACTAÇÃO DE SOLOS: INFLUÊNCIA DE MÉTODOS E DE PARÂMETROS
DE COMPACTAÇÃO NA ESTRUTURA DOS SOLOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C932c
2007

Crispim, Flavio Alessandro, 1981-
Compactação de solos: influência de métodos e de
parâmetros de compactação na estrutura dos solos / Flavio
Alessandro Crispim. - Viçosa, MG, 2007.
xix, 77f.: il. (algumas col.); 29cm.

Inclui anexo.

Orientador: Dario Cardoso de Lima.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 61-64.

1. Solos - Compactação. 2. Mecânica do solo.
3. Deformações e tensões. 4. Microestrutura. 5. Solos -
Testes. 6. Rodovias. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

CDD 22.ed. 624.151363

FLAVIO ALESSANDRO CRISPIM

COMPACTAÇÃO DE SOLOS: INFLUÊNCIA DE MÉTODOS E DE PARÂMETROS
DE COMPACTAÇÃO NA ESTRUTURA DOS SOLOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 19 de março de 2007.



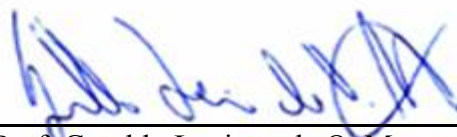
Prof. Carlos Alexandre B. de Carvalho
(Co-Orientador)



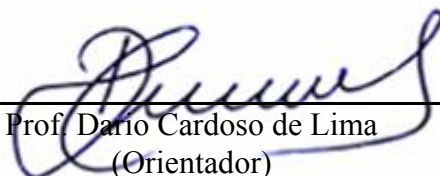
Prof. Carlos Ernesto G. R. Schaefer
(Co-Orientador)



Prof. Carlos Cardoso Machado



Prof. Geraldo Luciano de O. Marques



Prof. Dario Cardoso de Lima
(Orientador)

Aos meus pais
Aos meus irmãos
Aos amigos

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Providência Divina, por tudo que tenho recebido.

Aos meus pais Geraldo e Ermelinda, pelos incentivos e conselhos.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização dos Cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aos Departamentos de Engenharia Civil (DEC) e de Solos (DPS) da UFV, pela disponibilização da infra-estrutura necessária à realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo concedida durante a realização do presente trabalho.

Em especial aos professores Paulo Sérgio de Almeida Barbosa e Cláudio Henrique de Carvalho Silva, pelo apoio e confiança depositada.

Ao professor Dario Cardoso de Lima, pela orientação, paciência e exemplo de profissionalismo.

Aos professores co-orientadores Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer, pelas críticas e sugestões que muito contribuíram para a realização do presente trabalho.

A Elisson Brandão, bolsista de iniciação científica, que muito contribuiu para a realização dos ensaios referentes ao presente trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia Civil da UFV, Andréia Lopes, Danilo Rezende, Edgar Neto, Elisson Brandão, Eric Medeiros, Fernando Caneschi,

Gisele Custódio, Gersonito Vieira, Néia Soares, Rodrigo Zorzal, Simone Cristina, Thatiana Lelis e Tiago Trindade, pelo excelente convívio.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil, em especial a Júlio Carlos dos Santos, pela expressiva colaboração.

Enfim, a todos não citados, que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

FLAVIO ALESSANDRO CRISPIM, engenheiro civil, filho de Geraldo Leopoldo Crispim e Ermelinda Maria Crispim, é natural de Estiva, Minas Gerais.

Em março de 1999, ingressou no curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, concluindo-o em julho de 2004.

Em março de 2005, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Área de Concentração em Geotecnia, ao nível de mestrado, submetendo-se a defesa de tese em março de 2007.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização do trabalho	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Introdução	4
2.2. Comportamento geotécnico dos solos compactados	6
2.2.1. Solos coesivos	7
2.2.2. Solos não-coesivos	11
2.3. Tipos de compactação em laboratório	12
2.4. Micromorfologia.....	17
2.5. Análise estatística	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1. Solos	24
3.2. Métodos	26

3.2.1. Estudo da influência do método de compactação na estrutura dos solos	29
3.2.2. Estudo da influência do número de camadas do corpo-de-prova	30
3.2.3. Estudo da influência do diâmetro do cilindro	31
3.2.4. Análise estatística	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1. Resultados dos ensaios de caracterização	32
4.2. Resultados dos ensaios de compactação	33
4.3. Análise da influência do método de compactação na curva de compactação dos solos	34
4.3.1. Micromorfologia	38
4.4. Análise da influência do número de camadas de solo na compactação	46
4.5. Análise da influência do diâmetro do cilindro de compactação	52
5. CONCLUSÕES	57
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO	65
A.1. Estudo da influência do método de compactação na estrutura dos solos	66
A.2. Estudo da influência do número de camadas do corpo-de-prova	69
A.3. Estudo da influência do diâmetro do cilindro	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Terminologia sugerida por Terzaghi para a classificação de areias segundo a compacidade (Carvalho, 1997)	12
Tabela 2.	Características inerentes a cada energia de compactação, segundo a NBR 7182/86 (ABNT,1986)	14
Tabela 3.	Valores observados de um experimento inteiramente casualizado com igual número de repetições	21
Tabela 4.	Análise de variância de um experimento inteiramente casualizado, com igual número de repetições	22
Tabela 5.	Caracterização geotécnica dos solos 1 e 2, realizada no presente trabalho	26
Tabela 6.	Resumo dos ensaios realizados nos estudos da influência da modalidade de compactação, diâmetros dos cilindros e número de camadas dos corpos-de-prova na estrutura dos solos 1 e 2	27
Tabela 7.	Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados no presente trabalho	33
Tabela 8.	Parâmetros ótimos de compactação dos Solos 1 e 2, segundo resultados de ensaios realizados na energia Proctor normal	33
Tabela 9.	Teores de umidade empregados na moldagem dos corpos-de-prova	33

Tabela 10.	Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica.....	35
Tabela 11.	Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica.....	35
Tabela 12.	Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para os parâmetros γ_s e RCNC dos solos 1 e 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica.....	37
Tabela 13.	Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	48
Tabela 14.	Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	49
Tabela 15.	Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para os parâmetros γ_s e RCNC do Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	51
Tabela 16.	Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para os parâmetros γ_s e RCNC do Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	51
Tabela 17.	Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35mm, 73 mm e 100 mm.....	53
Tabela 18.	Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35mm, 73 mm e 100 mm.....	54
Tabela 19.	Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para parâmetros γ_s e RCNC do Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.....	56

Tabela 20.	Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para os parâmetros γ_s e RCNC do Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.....	56
Tabela A.1	Resultados de h, γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica.....	66
Tabela A.2	Resultados de h, γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica.....	67
Tabela A.3	Teste t aplicado aos resultados obtidos para o Solo 1, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica	68
Tabela A.4.	Teste t aplicado aos resultados obtidos para o Solo 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica	68
Tabela A.5	Resultados de h, γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	69
Tabela A.6	Resultados de h, γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	70
Tabela A.7.	Análise de variância aplicada aos resultados de γ_s obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	71
Tabela A.8.	Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de γ_s obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	71
Tabela A.9.	Análise de variância aplicada aos resultados de RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas	71
Tabela A.10.	Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	72
Tabela A.11.	Análise de variância aplicada aos resultados de γ_s obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	72

Tabela A.12. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de γ_s obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	72
Tabela A.13. Análise de variância aplicada aos resultados de RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas	73
Tabela A.14. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	73
Tabela A.15 Resultados de h, γ_s e RCNC obtidos para os solos 1 e 2, empregando-se corpos-de-prova compactados no diâmetro de 35 mm*	74
Tabela A.16. Análise de variância aplicada aos resultados de γ_s obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm	75
Tabela A.17. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de γ_s obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.....	75
Tabela A.18. Análise de variância aplicada aos resultados de RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm	75
Tabela A.19. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.....	76
Tabela A.20. Análise de variância aplicada aos resultados de γ_s obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm	76
Tabela A.21. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de γ_s obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.....	76

Tabela A.22. Análise de variância aplicada aos resultados de RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm	77
Tabela A.23. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Aspecto da curva de compactação de um solo.	5
Figura 2.	Influência da energia de compactação nas curvas de compactação de um mesmo solo, empregando-se diferentes energias de compactação (Modificado de DNIT, 2006).	5
Figura 3.	Compactação de solos na energia do ensaio Proctor normal, considerando-se granulometrias na faixa das argilas aos pedregulhos (Modificado de PINTO, 2000).	6
Figura 4.	Comparação entre a compactação estática, segundo a concepção de Porter, e dinâmica. Adaptado de Rico e Del Castillo (1976).	16
Figura 5.	Exemplo de caracterização micromorfológica de uma fotomicrografia de um Latossolo Roxo, com aumento de 50 vezes (MALTONI, 1994).	18
Figura 6.	Locais de coleta das amostras de solos.	25
Figura 7.	Curvas granulométricas dos solos 1 e 2.	26
Figura 8.	Fluxograma dos ensaios realizados para cada solo	28
Figura 9.	Figura esquemática indicando a região de retirada das lâminas analisadas.....	30
Figura 10.	Curvas de compactação e resistências à compressão não confinada para os solos 1 e 2.....	34

Figura 11.	Diferenças relativas entre médias obtidas para os parâmetros γ_s e RCNC dos solos 1 e 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica.....	36
Figura 12.	Fotomicrografias realizadas em lâminas do Solo 1 obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente no teor de umidade h_{ot}	39
Figura 13.	Fotomicrografias realizadas em lâminas do Solo 1 obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente no teor de umidade $h_{ot} - 3\%$	40
Figura 14.	Imagens escaneadas do Solo 1, empregando-se lâminas obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente.	41
Figura 15.	Fotomicrografias realizadas em lâminas do Solo 2 obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente no teor de umidade h_{ot}	42
Figura 16.	Fotomicrografias realizadas em lâminas do Solo 2 obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente no teor de umidade $h_{ot} - 3\%$	43
Figura 17.	Imagens escaneadas do Solo 2, empregando-se lâminas obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente.	44
Figura 18.	Curvas de compactação e resistências à compressão não confinada para os solos 1 e 2.....	47
Figura 19.	Diferenças relativas entre médias obtidas para os parâmetros γ_s e RCNC dos solos 1 e 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.....	50
Figura 20.	Curvas de compactação e resistências à compressão não confinada para os solos 1 e 2.....	52
Figura 21.	Diferenças relativas entre médias obtidas para os parâmetros γ_s e RCNC dos solos 1 e 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
CV	Coefficiente de variação (desvio padrão/ média)
cp's	Corpos-de-prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
h	Teor de umidade
h_{ot}	Teor de umidade ótimo
$h_{ot} - 3\%$	Teor de umidade ótimo menos 3%
$h_{ot} + 2\%$	Teor de umidade ótimo mais 2%
IP	Índice de plasticidade ($IP = LL - LP$)
LL	Límite de plasticidade
RCNC	Resistência à compressão não confinada
δ	Massa específica dos sólidos
γ_s	Massa específica aparente seca
$\gamma_{s\ máx}$	Massa específica aparente seca máxima
$\gamma_{s\ mín}$	Massa específica aparente seca mínima
e	Índice de vazios do solo
$e_{máx}$	Índice de vazios do solo no estado mais solto possível
$e_{mín}$	Índice de vazios do solo no estado mais denso possível
\bar{x}	Média
s	Desvio padrão

RESUMO

CRISPIM, Flavio Alessandro, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2007.

Compactação de solos: influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos. Orientador: Dario Cardoso de Lima. Co-orientadores: Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer e Claudio Henrique de Carvalho Silva.

Comumente, a compactação de corpos-de-prova de solos em laboratório processa-se por vias dinâmica (cilindro Proctor e soquete, por exemplo) ou estática (aplicação de tensão constante ao solo), sendo comum associar a estes procedimentos curvas de compactação similares. Porém, essa hipótese tem sido questionada, em especial a partir de resultados de estudos realizados com solos para fins rodoviários no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. O presente trabalho direcionou-se ao estudo da influência de parâmetros de moldagem de corpos-de-prova nas curvas de compactação de laboratório e na resistência mecânica de dois solos residuais de gnaisse da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, respectivamente, de texturas argilo-areno siltosa (Solo 1) e areno-silto-argilosa (Solo 2), com abordagem dos seguintes aspectos: (i) método de compactação: métodos estático e dinâmico; (ii) número de camadas dos corpos-de-prova: uma, duas e três camadas e (iii) diâmetro do cilindro de compactação: 35 mm, 73 mm e 100 mm. Empregaram-se, além dos resultados obtidos para as curvas de compactação dos solos, resultados de ensaios de compressão não confinada realizados em corpos-de-prova compactados em teores de umidade pré-determinados [h_{ot} , ($h_{ot} - 3\%$), ($h_{ot} + 2\%$)], considerando-se a energia de compactação do ensaio Proctor normal, para a avaliação da ocorrência de mudanças

estruturais nos solos. Para fins práticos de engenharia e com base em análise estatística (ANOVA), pode-se concluir que: (i) houve influência significativa dos elementos analisados nos parâmetros ótimos de compactação, considerando-se os modos de compactação empregados; (ii) para ambos os solos, ocorreram mudanças estruturais significativas representadas por variações na resistência à compressão não confinada dos solos analisados, evidenciando ainda a importância dos processos de formação dos solos nas suas respostas mecânicas quando compactados; (iii) quanto à influência do número de camadas dos corpos-de-prova nos parâmetros ótimos de compactação e de resistência mecânica, notou-se que a compactação em duas e três camadas levou aos mesmos resultados, não sendo recomendável a compactação em apenas uma camada e (iv) quanto à influência do diâmetro do cilindro de compactação nos parâmetros ótimos de compactação e resistência mecânica, observou-se influência significativa para o Solo 1 (mais argiloso) e não significativa para o Solo 2 (mais arenoso).

ABSTRACT

CRISPIM, Flavio Alessandro, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2007.
Soil compaction: influence of compaction methods and compaction parameters in soils structure. Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-advisors: Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer and Claudio Henrique de Carvalho Silva.

Commonly, compaction of soil specimens in laboratory is processed by dynamic (Proctor test) or static (application of constant tension to the soil) compaction tests, being common to associate similar compaction curves to both procedures. However, data from studies developed in the Civil Engineering Laboratory of the Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brazil, for road engineering applications brought new inside into this hypothesis and led to this research that addresses the analysis of the influence of compaction modes and compaction parameters in the laboratory compaction curves and in the mechanical strength of two gneiss residual soils from the Zona da Mata Norte of Minas Gerais state, respectively a silty-sandy clay (Soil 1) and a clayey-silty sandy (Soil 2). This research encompassed the following aspects: (i) compaction procedures: static and dynamic compaction modes; (ii) number of specimen layers: one, two and three layers and (iii) diameter of the compaction cylinder: 35 mm, 73 mm and 100 mm. Besides that, evaluation of the influence of compaction modes in the soils specimens structures was based on analysis of data from unconfined compression tests performed in specimens compacted at pre-established water contents (hot, hot - 3% and hot + 2%) using the Standard Proctor compaction effort. Concerning engineering practical applications and based on statistical data

analysis (ANOVA) conclusions are as follows: (i) there was significant influence of compaction modes on soils optimum compaction parameters; (ii) there were significant structural changes in the soils specimens due to the application of different compaction modes, as well as it was evident the importance of soils processes formation in their mechanical responses; (iii) regarding influence of the number of specimen layers in soil optimum compaction parameters and mechanical strength, it was observed that compaction using two and three layers led to the same results, not being recommended compaction in one layer and (iv) regarding influence of compaction mold diameter in soil optimum compaction parameters and mechanical strength, it was observed significant influence for Soil 1 (more clayey) and not significant influence for Soil 2 (more sandy).

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A compactação pode ser entendida como a diminuição de volume de um solo sem variação no seu teor de umidade ou massa, sendo um processo que, essencialmente, altera a sua estrutura. Ralph R. Proctor, na década de 1930, trouxe importante contribuição para o desenvolvimento da técnica de compactação de solos, mostrando a relação entre os parâmetros massa específica aparente seca, teor de umidade e energia de compactação.

Internacionalmente, o ensaio de compactação mais comum é o desenvolvido por Proctor, sendo que no Brasil o mesmo foi normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1986) e pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes - DNIT, antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994). No entanto, em laboratórios geotécnicos, são utilizados vários métodos de compactação, procurando se aproximar, tanto quanto possível, das condições encontradas em campo e buscando reduzir o tempo de compactação de corpos-de-prova.

A avaliação da influência de diferentes métodos e de parâmetros de compactação na curva de compactação e, conseqüentemente, no comportamento mecânico dos solos envolve um grau elevado de dificuldade, devido ao número significativo de fatores envolvidos. Visando avançar o estado de conhecimento nessa

área, o presente trabalho abordou a influência de procedimentos de compactação em laboratório na estrutura dos solos.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho abordou o estudo de parâmetros de compactação de amostras de dois solos residuais de gnaiss, respectivamente, um material saprolítico (horizonte C) de um solo jovem e um material latossólico (horizonte B) de um solo maduro da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, com um direcionamento para a construção de aterros. Os objetivos específicos deste trabalho foram os descritos a seguir:

- caracterização geotécnica dos solos;
- estudo da influência de métodos e de parâmetros de compactação em laboratório na estrutura dos solos, considerando resultados de ensaios de compactação e de resistência mecânica;
- estudo, em escala micromorfológica, dos solos após compactação em laboratório, para fins de avaliação da ocorrência de mudanças estruturais que viessem subsidiar a análise dos resultados obtidos nos ensaios de compactação e de resistência mecânica.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado como segue:

- no Capítulo 2, são revisados conceitos relativos à compactação de solos coesivos e não coesivos, apresenta-se um resumo histórico do desenvolvimento do estudo do comportamento de solos coesivos compactados e considerações sobre processos de compactação em laboratório, em especial sobre os processos dinâmico e estático de compactação. São feitas, ainda, breves considerações sobre a importância de análises micromorfológicas no estudo de solos compactados, assim como tecem-se considerações sobre os procedimentos estatísticos utilizados na análise dos resultados obtidos;

- no Capítulo 3, são descritas as características dos solos analisados, bem como os ensaios de laboratório realizados;
- o Capítulo 4 traz a apresentação e discussão dos resultados obtidos, estando dividido em subitens onde são analisadas: (i) a influência do método de compactação na curva de compactação dos solos, incluindo análise micromorfológica; (ii) a influência do número de camadas de solo na compactação e (iii) a influência do diâmetro do cilindro de compactação;
- o Capítulo 5 resume os resultados encontrados e o Capítulo 6 traz sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. INTRODUÇÃO

O fenômeno da compactação de um solo consiste, basicamente, na redução de seu índice de vazios, obtida por meio da ação de uma força mecânica, sendo comum associar-se a esta redução a ocorrência de variação na sua fase gasosa.

Historicamente, destaca-se que na década de 1930 o engenheiro Ralph R. Proctor publicou, nos Estados Unidos da América, as suas observações sobre a compactação de aterros de solos, mostrando que ao se aplicar uma determinada energia de compactação, representada por um certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou por um certo número de golpes de um soquete sobre o solo contido num molde em laboratório, havia uma relação única entre a massa específica aparente seca e o teor de umidade de compactação, para uma determinada energia de compactação utilizada. Segundo Pinto (2000), a padronização internacional do ensaio de compactação, com pequenas variações, baseou-se nesses estudos de Proctor, sendo o mesmo mais conhecido como *Ensaio Proctor*, podendo-se referir no Brasil, às Normas Técnicas NBR 7182/86 (ABNT, 1986) e DNER - ME 129/94 (DNER, 1994).

Em geral, a relação entre os parâmetros massa específica aparente seca (γ_s) e teor de umidade (h) pode ser descrita por uma curva de formato aproximadamente parabólico, como mostra a Figura 1. A curva tem seu ponto máximo definido pelo par de valores massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{smáx}$) e umidade ótima ($h_{ót}$),

segundo a terminologia empregada pela ABNT (1986). Comumente, o trecho ascendente da curva de compactação é conhecido como ramo seco e o descendente como ramo úmido.

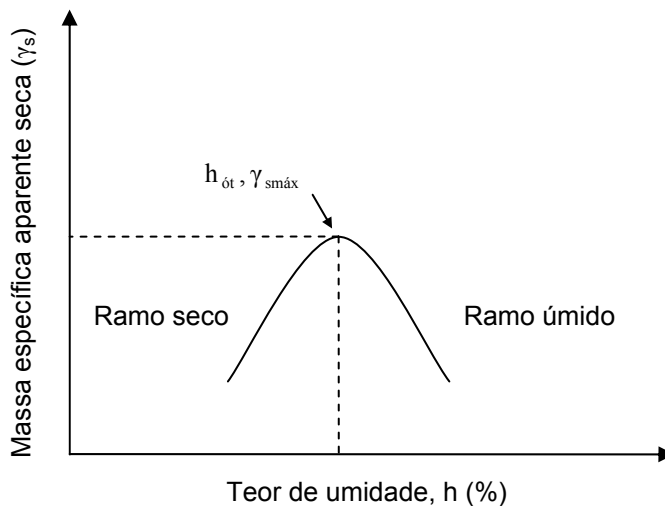


Figura 1. Aspecto da curva de compactação de um solo.

Quando um mesmo solo é compactado segundo um mesmo procedimento, mas com emprego de diferentes níveis de energia de compactação, verifica-se que, na medida em que a energia de compactação aumenta, a umidade ótima diminui e a massa específica seca máxima aumenta, conforme pode ser visto na Figura 2.

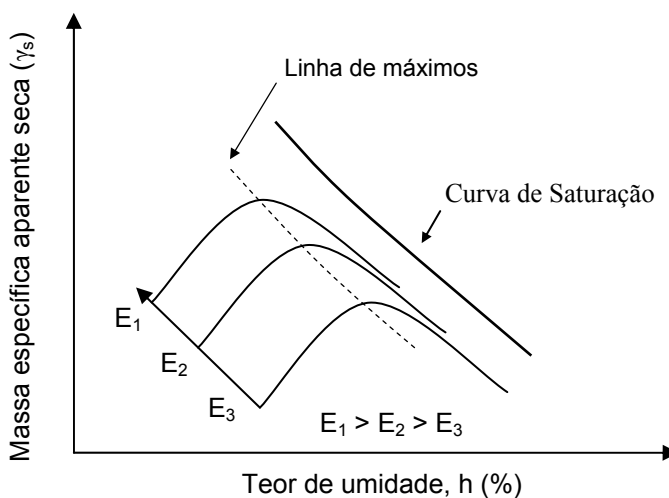


Figura 2. Influência da energia de compactação nas curvas de compactação de um mesmo solo, empregando-se diferentes energias de compactação (Modificado de DNIT, 2006).

Por outro lado, a influência do tipo de solo na curva de compactação encontra-se ilustrada na Figura 3. Considerando-se uma mesma energia de compactação, observa-se que, em geral, os solos argilosos apresentam umidades ótimas mais elevadas e massas específicas aparentes secas máximas menores do que os solos siltosos e arenosos.

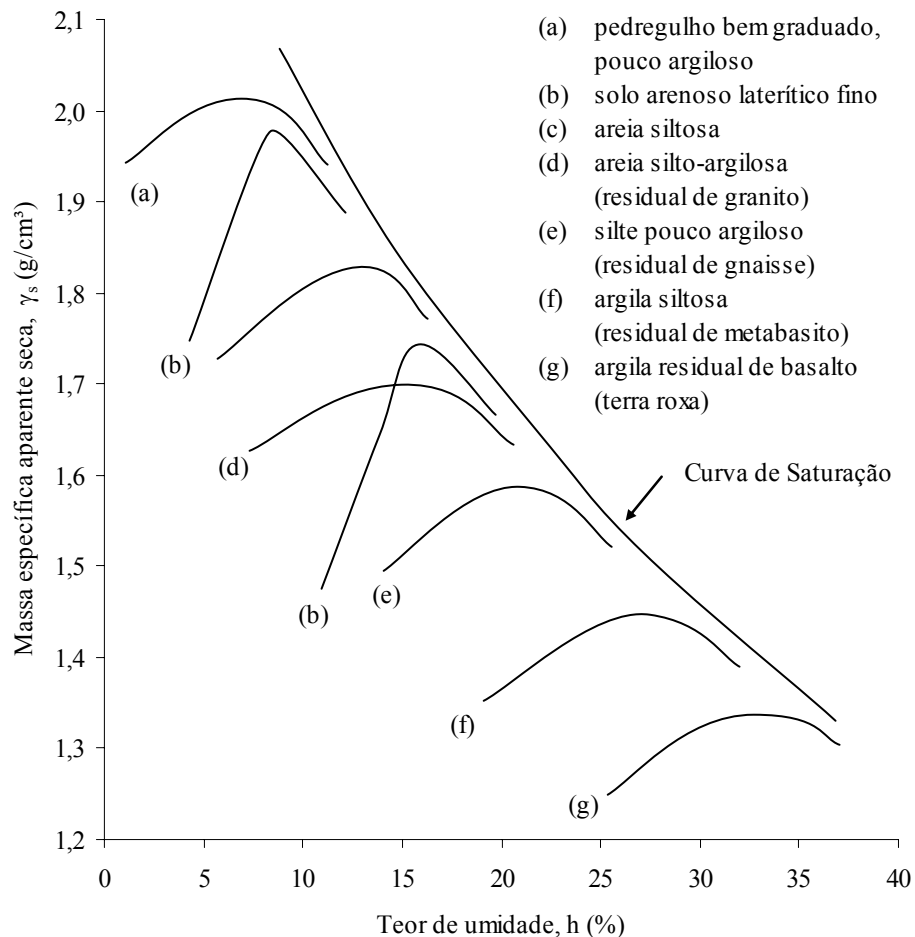


Figura 3. Compactação de solos na energia do ensaio Proctor normal, considerando-se granulometrias na faixa das argilas aos pedregulhos (Modificado de PINTO, 2000).

2.2. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS SOLOS COMPACTADOS

Características importantes na construção de obras de terra como resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade são, em geral, dependentes do índice de vazios do solo, sendo comum associar-se à sua redução aumento na resistência ao cisalhamento e reduções na deformabilidade e na permeabilidade destes materiais de

construção. A compactação, portanto, busca a melhoria das características dos solos empregados em obras de engenharia civil.

Sob esse prisma, pode-se dizer que cabe ao engenheiro projetista de uma obra de terra especificar qual é a redução necessária do índice de vazios para um determinado fim de engenharia e definir a melhor maneira de obtê-la no campo, após a obtenção dos parâmetros de projeto, em geral, via ensaios de compactação realizados em laboratório. Essa decisão envolve a escolha do equipamento de compactação, assim como a definição do processo construtivo e das etapas do controle de compactação no campo.

Em Geotecnia, é comum dirigir o estudo do comportamento mecânico dos solos aos ditos coesivos (argilosos) e não-coesivos (arenosos). Com relação à curva de compactação desses materiais, sabe-se que a mesma é fruto de experimentação, seja ela processada no laboratório ou no campo. Uma pergunta sempre presente, mas nem sempre respondida de forma adequada, refere-se a uma explicação teórica para o comportamento apresentado por esta curva, isto é, para a sua forma geométrica.

2.2.1.SOLOS COESIVOS

Os solos coesivos são constituídos por partículas de minerais argilosos de dimensões muito reduzidas e de forma lamelar (GUEDES DE MELO, 1985). As partículas coloidais de solo, em geral, apresentam cargas elétricas nas superfícies, que se relacionam com as superfícies específicas das mesmas (LAMBE, 1979). Como a superfície específica dos solos coesivos, via de regra, é elevada, observa-se uma influência expressiva das cargas elétricas no comportamento mecânico destes materiais, sendo esta predominante sobre as forças de massa. Além disso, tensões capilares e tensões entre grãos ou agrupamento de grãos exercem, também, importante influência no comportamento dos solos coesivos.

O comportamento mecânico de solos coesivos compactados é geralmente caracterizado através da relação existente entre massa específica aparente seca e teor de umidade, para uma determinada energia de compactação. A simplicidade de obtenção e a confiabilidade destes dois parâmetros no controle indireto de parâmetros de projeto, tais como resistência ao cisalhamento e deformabilidade, fazem com que sejam largamente utilizados, por exemplo, no controle de qualidade de aterros compactados.

Com relação à curva de compactação de solos coesivos, geralmente, pode-se afirmar que o ramo seco possui índice de vazios relativamente elevado, verificando-se maior resistência ao cisalhamento e menor deformabilidade. Já o ramo úmido da curva de compactação tende a ser paralelo à curva teórica de índice de vazios nulo ou curva de 100% de saturação, como se ilustra na Figura 2, sendo que o solo compactado neste trecho é, em geral, menos resistente a esforços cisalhantes e mais deformável do aquele compactado no ramo seco.

Vários pesquisadores propuseram explicações teóricas para a forma da curva de compactação de solos coesivos, em geral, com abordagem de aspectos qualitativos, uma vez que é difícil quantificar o fenômeno, dada à complexidade dos fatores envolvidos. Guedes de Melo (1985), por exemplo, considera que a compactação dos solos pode envolver aspectos de capilaridade, poropressões (de ar e de água), pressões osmóticas, fenômenos de superfície, além de conceitos de tensão efetiva, tensão de cisalhamento e compressibilidade.

Hilf (1992) apresentou uma visão crítica da evolução das teorias de compactação, com especial destaque para:

- Proctor¹, que relatou que no ramo seco da curva de compactação, forças de atrito entre partículas criadas por tensões capilares existentes opõem resistência aos esforços de compactação, resultando em índices de vazios relativamente elevados e massas específicas aparentes secas baixas; porém, na medida em que se acrescenta água ao solo ocorrem efeitos de lubrificação entre suas partículas que produzem arranjos mais compactos. Incrementos sucessivos no teor de umidade implicam em diminuição de vazios até um ponto em que os mesmos são mínimos e a densidade é máxima para o método de compactação utilizado, alcançando-se o par de valores massa específica aparente seca máxima e umidade ótima; acréscimos no teor de umidade além deste ponto, resultam em redução das forças capilares e afastamento interpartículas, ficando o solo menos denso e mais plástico;

¹ PROCTOR, R. R. (1933). The design and construction of rolled earth dams. **Engineering News-Record**, III, August 31, September 7, 21, and 28.

- Hilf², que explicou a forma da curva de compactação através de conceitos de pressão capilar e pressão na fase gasosa dos solos. Para baixos teores de umidade, formam-se meniscos de pequeno raio de curvatura entre as partículas do solo, que levam à ocorrência de solos de baixa densidade no ramo seco da curva de compactação. Posterior umedecimento do solo leva à suavização dos meniscos e, conseqüentemente, à perda de capacidade de resistir aos esforços de compactação. Assim, os vazios existentes, inicialmente grandes e interligados, vão se tornando cada vez menores, perdendo ligações entre si, até que próximo da umidade ótima é quase impossível expulsar o ar do solo. Após esse ponto, reduções na densidade do solo se devem ao aprisionamento do ar nos poros, com conseqüente geração de poro-pressão na fase gasosa e redução na eficiência do processo de compactação;
- Lambe³, que analisou a curva de compactação dos solos a partir de conceitos de fenômenos de superfície, considerou que em baixos teores de umidade a dupla camada difusa não se encontra plenamente desenvolvida, resultando em altas concentrações eletrolíticas e redução das forças de repulsão entre partículas. Como conseqüência, ocorre floculação das partículas com baixo grau de orientação resultando em um solo de baixa densidade. Teores de umidade maiores permitem o desenvolvimento da dupla camada difusa, reduzindo o grau de floculação e produzindo estruturas mais dispersas. Acréscimos no teor de umidade resultam em nova expansão da dupla camada, com redução das forças de atração entre partículas e redução da concentração de sólidos e levando a estruturas menos densas;
- Olson⁴, que utilizou o conceito da tensão efetiva para explicar a curva de compactação dos solos, entendeu que no ramo seco da curva de

² HILF, J. W. **An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils**. Denver, Colorado: Technical Memorandum 654, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1956.

³ LAMBE, T. W. Structure of compacted clay. **Transactions ASCE**, 125, pp. 682-705, 1960.

⁴ OLSON, R. E. Effective stress theory of soil compaction. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, 89, No. SM2, pp. 27-45, 1963.

compactação um aumento no teor de umidade resulta na elevação da pressão nas fases líquida e gasosa, reduzindo a tensão efetiva e permitindo, assim, que ocorra um melhor rearranjo das partículas. Acrescentando-se mais água ao solo, as partículas deslizam umas sobre as outras, até que se desenvolvam tensões laterais e tensões cisalhantes horizontais na camada compactada, levando o solo a um nível de tensões efetivas que lhe permita resistir aos novos esforços de compactação. À medida que se aumenta o quantitativo de água no solo, os vazios vão ficando cada vez menores, até que se atinja uma umidade, na qual, se tornam descontínuos e impedem a saída de ar. Nesse momento, não há mais redução do volume da massa de solo, tendo-se alcançado a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima, para a energia empregada no processo de compactação. Para o ramo úmido, com o aumento do teor de umidade a deformação aumenta e a massa específica aparente seca do solo diminui;

- Barden e Sides⁵, que relataram que para baixos teores de umidade o solo se estrutura, formando grumos de partículas, sendo que quanto mais seco o solo mais secos e rígidos são os grumos. Efeitos de capilaridade proporcionam a esta estrutura condições para resistir aos esforços de compactação sem muita distorção. Aumentando o teor de umidade os grumos são molhados e, conseqüentemente, apresentam menor resistência mecânica, são mais facilmente distorcidos e preenchem os poros existentes, que tendem a desaparecer próximo da umidade ótima. Assim, os vazios preenchidos por ar perdem a continuidade, colocando-se um limite na capacidade de redução de volume de um solo pela expulsão do ar dos seus poros.

Percebe-se, pois, que há uma gama significativa de explicações, não necessariamente excludentes, para a curva de compactação dos solos coesivos. A tendência é a aceitação tácita de que na umidade ótima os vazios do solo encontram-se praticamente obstruídos, apresentando a permeabilidade ao ar da ordem de zero, como relatam Langfelder et al (1968) e Barden e Sides (1970), visão esta compartilhada, também, por Guedes de Melo (1985) e por Hilf (1992).

⁵ BARDEN, L.; SIDES, G. R. Engineering behavior and structure of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, 96, No. SM4, p. 1171, 1970.

2.2.2. SOLOS NÃO-COESIVOS

De um modo geral as partículas de solos não-coesivos têm geometria bastante diferente da forma lamelar comum aos solos coesivos. A relação superfície-volume desses solos é muito menor e, portanto, os efeitos ligados aos fenômenos de superfície são pouco importantes ou mesmo desprezíveis.

Quando compactados, em geral, os solos não-coesivos não apresentam uma curva de compactação bem definida, como ocorre com os coesivos. Para uma dada energia de compactação a massa específica aparente seca é relativamente elevada, estando o solo seco ou saturado. Em teores de umidade intermediários, dependendo da granulometria do solo, podem ocorrer pequenas tensões de capilaridade que oferecem resistência ao esforço de compactação, resultando em pequena variação na massa específica aparente seca. Assim, os conceitos de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima podem perder significado, sendo comum caracterizar os solos não-coesivos através do parâmetro *compacidade relativa* (CR) definido a seguir:

$$CR = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} \quad (1)$$

ou,

$$CR = \frac{\gamma_{s \text{ máx}} (\gamma_s - \gamma_{s \text{ mín}})}{\gamma_s (\gamma_{s \text{ máx}} - \gamma_{s \text{ mín}})} \quad (2)$$

onde:

- $e_{\text{máx}}$: índice de vazios do solo no estado mais solto possível;
- $e_{\text{mín}}$: índice de vazios do solo no estado mais denso possível;
- e : índice de vazios do solo no estado considerado;
- $\gamma_{s \text{ máx}}$: massa específica aparente seca do solo no estado mais denso possível;
- $\gamma_{s \text{ mín}}$: massa específica aparente seca do solo no estado mais solto possível;
- γ_s : massa específica aparente seca do solo no estado considerado.

No Brasil, os índices $e_{\text{máx}}$ e $e_{\text{mín}}$ são determinados segundo prescrições, respectivamente, das Normas Técnicas NBR 12004/90 (ABNT, 1990) e NBR 12051/91 (ABNT, 1991).

De acordo com a definição apresentada, CR varia de 0 a 1, respectivamente para solos nos estados mais solto e mais compacto possíveis. Como destaca Guedes de Melo (1985), uma classificação puramente arbitrária divide os solos não coesivos em: compactos ($CR > 0,70$), soltos ($CR < 0,30$) e medianamente compactos ($0,30 < CR < 0,70$). Carvalho (1997) apresenta a terminologia sugerida por Terzaghi para a classificação das areias a partir do parâmetro compacidade relativa, como se apresenta na Tabela 1.

Tabela 1. Terminologia sugerida por Terzaghi para a classificação de areias segundo a compacidade (Carvalho, 1997)

Classificação	Compacidade Relativa, CR (%)
Areia muito fofa	Abaixo de 15
Areia fofa	Entre 15 e 35
Areia medianamente densa	Entre 35 e 70
Areia densa	Entre 70 e 85
Areia muito densa	Acima de 85

Destaca-se que as características de compressibilidade e resistência ao cisalhamento dos solos não-coesivos relacionam-se com as suas compacidades relativas. Em geral, os solos não-coesivos são mais compressíveis quanto menores forem as suas compacidades relativas e mais resistentes ao cisalhamento quanto maiores forem estas.

2.3. TIPOS DE COMPACTAÇÃO EM LABORATÓRIO

A compactação no campo, em geral, envolve processos caros e demorados, dificultando estudos mais aprofundados. Sendo assim, os processos de compactação em laboratório são importantes, pois permitem que se reproduza, de maneira mais fácil e econômica, larga faixa de casos de campo, como destacam Rico e Del Castillo (1976). Segundo esses autores, a compactação de corpos-de-prova em laboratório é feita por quatro vias, a saber:

- compactação por impacto, caracterizada pela ação de queda de um soquete sobre a camada de solo. Destaca-se que Lambe (1979) classifica essa modalidade como dinâmica, terminologia esta que é, também, empregada no presente trabalho;
- compactação estática, onde se exerce uma pressão constante sobre o solo, a uma velocidade relativamente pequena;
- compactação por amassamento, onde os golpes são aplicados ao solo através de um pistão com mola, em vez da tradicional queda do soquete, iniciando-se a compactação pela parte inferior da camada, à semelhança da compactação no campo com o equipamento pé-de-carneiro;
- compactação por vibração, onde, comumente, pode-se ou não colocar uma sobrecarga sobre a camada de solo a ser compactada, aplicando-se vibração ao conjunto.

O ensaio mais utilizado de compactação dinâmica é aquele desenvolvido por Proctor, que foi inicialmente normatizado pela, hoje, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* dos Estados Unidos da América e é conhecido como *AASHTO Standard* ou Ensaio Proctor normal. No Brasil, esse ensaio é normatizado pela ABNT por meio da NBR 7182/86 “Solo - Ensaio de Compactação” (ABNT, 1986), existindo também normatização do DNIT, DNER-ME 129/94 “Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas” (DNER, 1994). A Tabela 2 mostra as características do ensaio de compactação normatizado pela ABNT, contemplando além da energia normal, as energias intermediária e modificada.

Na moldagem de corpos-de-prova de dimensões que fogem àquelas prescritas pela NBR 7182/86 ou o DNER-ME 129/94, pode-se empregar a Equação 3, que fornece o número de golpes de um soquete não padronizado para compactar um determinado volume de solo em uma energia pré-estabelecida.

$$E = \frac{M \times H \times N_{gc} \times N_c}{V} \quad (3)$$

onde:

- E: energia de compactação;
- M: massa do soquete utilizado;

- H: altura de queda do soquete;
- N_{gc} : número de golpes aplicados por camada;
- N_c : número de camadas;
- V: volume de solo a ser compactado.

Tabela 2. Características inerentes a cada energia de compactação, segundo a NBR 7182/86 (ABNT,1986)

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia de Compactação		
		Normal	Intermediária	Modificada
	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
Pequeno	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
	Soquete	Grande	Grande	Grande
Grande	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

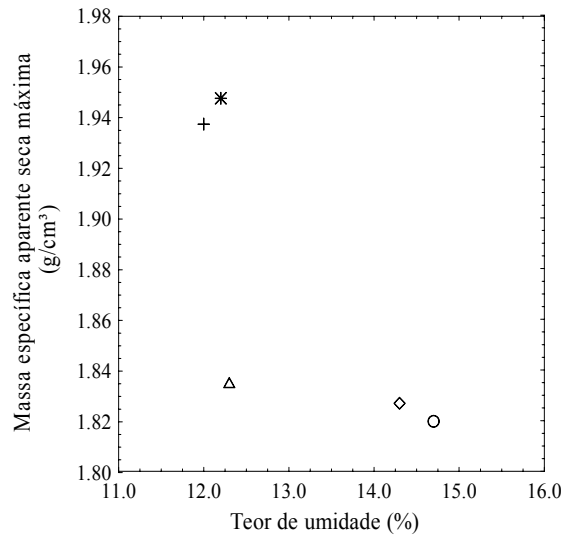
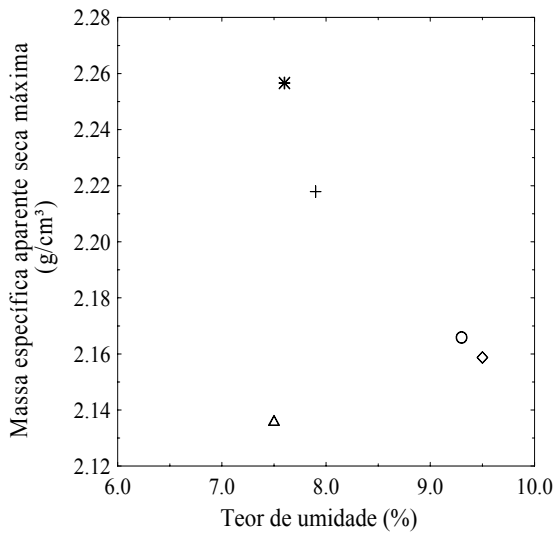
Quanto à compactação por amassamento, destaca-se o ensaio desenvolvido na Universidade de Harvard, em 1948. Trata-se de um método de compactação de solos em equipamento miniatura (Ensaio Harvard), onde se emprega um cilindro de 33,34 mm de diâmetro e 71,5 mm de altura. Head (1984) destaca que o corpo-de-prova é compactado em 3 camadas, com a aplicação, em cada uma, de 25 golpes de um pistão constituído por uma haste de 12,7 mm de diâmetro acionada por uma mola cujo esforço aplicado é da ordem de 180 N.

Segundo Rico e Del Castillo (1976), ensaios de laboratório utilizando compactação estática são tão antigos quanto os ensaios dinâmicos, sendo mais utilizados na compactação de solos granulares, no entanto, sem suficiente justificativa para este uso restrito. Esses autores relatam uma metodologia para a compactação estática em laboratório, atribuída a O. J. Porter, na qual o solo (passante na peneira de 25,4 mm) é compactado em um molde cilíndrico de 15,24 cm de diâmetro, sendo disposto em três camadas acomodadas com 25 golpes de uma vareta com ponta arredondada (em formato de bala) e então compactado por meio da aplicação de uma pressão de aproximadamente 14 MPa, que é mantida por um minuto.

Citando um estudo de Menchaca⁶, Rico e Del Castillo (1976) apresentam algumas comparações para diferentes solos entre a compactação estática, segundo a concepção de Porter e a compactação dinâmica. O estudo foi realizado com dezessete solos variando de pedregulhos até argilas de alta plasticidade. As conclusões relatadas indicam que, para solos variando de areias grossas a pedregulhos, limpos ou com finos não plásticos, os resultados da compactação estática são semelhantes aos obtidos com a compactação dinâmica na energia Proctor normal, como ilustra a Figura 4, itens (a) e (b). Em areias grossas e pedregulhos com finos plásticos, areias finas e argilas de plasticidade média, os resultados são próximos dos obtidos com a energia Proctor modificado, como apresenta a Figura 4c, bem como em argilas de plasticidade alta os resultados alcançados compactando-se estaticamente são superiores (cerca de 10%) àqueles do Proctor modificado, como ilustra a Figura 4d.

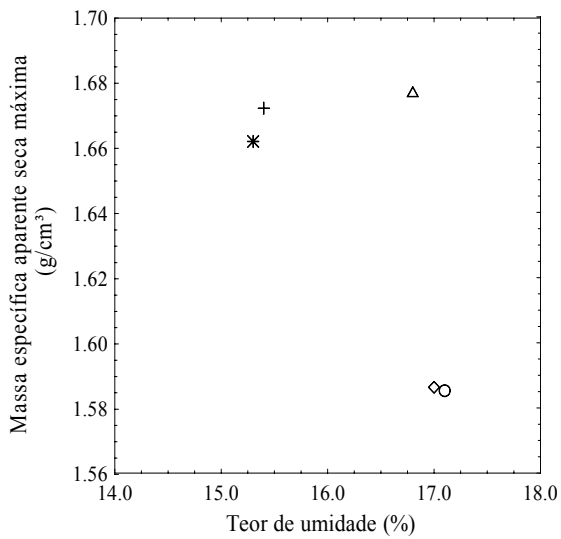
Vale destacar que no estudo de Menchaca a energia de compactação estática empregada não pode ser fixada, sendo dependente do tipo de solo, o que dificulta muito a análise dos resultados obtidos. Entende-se que qualquer comparação entre métodos de compactação deve ser feita a partir de processos que levam o solo à mesma massa específica aparente seca, para um mesmo teor de umidade, pois assim, diferenças nas propriedades do solo compactado podem ser atribuídas às alterações estruturais provocadas pelo método empregado.

⁶ MENCHACA, L. M. A. **Correlación entre las pruebas estáticas y dinámicas de compactación de suelos em el laboratorio**. México: Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM, 1964. (Dissertação de Mestrado).

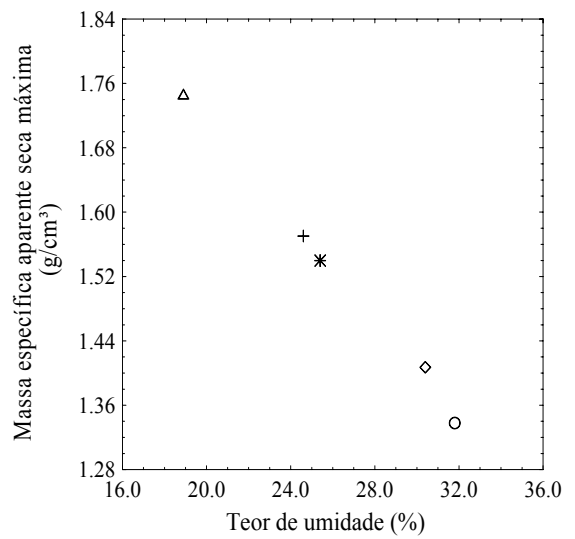


(a) Pedregulho angular com finos não plásticos, A-2-6 (0)

(b) Areia grossa com finos não plásticos, A-2-4 (0)



(c) Areia fina, A-3 (0)



(d) Argila de alta plasticidade, A-7-5 (19)

Onde:

- E-2 = energia do Proctor normal (AASHTO), em molde de 5,08 cm (2")
- ◇ E-4 = energia do Proctor normal (AASHTO), em molde de 10,16 cm (4")
- * M-2 = energia Proctor Modificada (AASHTO), em molde de 5,08 cm (2")
- + M-4 = energia Proctor Modificada (AASHTO), em molde de 10,16 cm (4")
- △ P = compactação estática (Porter), em molde de 15,24 cm (6")

Figura 4. Comparação entre a compactação estática, segundo a concepção de Porter, e dinâmica. Adaptado de Rico e Del Castillo (1976).

2.4. MICROMORFOLOGIA

Alguns aspectos do comportamento mecânico de solos não-saturados são pouco conhecidos, notadamente de solos tropicais, sendo que certas características morfológicas e microestruturais dos mesmos que podem ser relacionadas aos seus comportamentos geotécnicos são raramente quantificadas ou mesmo observadas (SCHAEFER, 2001; VIANA et al, 2004). Assim, estudos detalhados de natureza microestrutural dirigidos a solos brasileiros de interesse geotécnico se fazem necessários, em especial de solos compactados.

Características como tamanho, arranjo e orientação de partículas, assim como, poros e zonas de cisalhamento podem ser observadas utilizando técnicas de microscopia. Em particular, nos estudos de morfologia de solos a utilização do microscópio petrográfico ótico é bastante comum. O microscópio ótico permite a realização de imagens com aumento superior a 1.000 vezes, sendo comum, segundo Resende et al (2002), empregarem-se em análises micromorfológicas aumentos de 10 a 100 vezes, chegando excepcionalmente a 500 vezes. Esses autores destacam que o estudo de imagens realizadas em microscópio ótico a partir de seções finas (aproximadamente 25 μm de espessura) permite identificar a organização (forma) do solo ou mesmo partículas, de tamanho superior a 20 μm , sendo, porém, difícil identificar partículas menores e praticamente impossível identificar aquelas menores do que 5 μm .

A estrutura de um solo pode ser entendida como formada pelos grãos do esqueleto e pelo plasma. O esqueleto é formado por grãos de tamanho superior ao coloidal (cerca de 10^{-6} a 10^{-9} m), enquanto que o plasma, de tamanho coloidal, representa o material passível de ser movimentado por efeito de ações mecânicas ou pela ação da água no solo.

Os vazios presentes no solo constituem os poros, os quais podem ser divididos em microporos e macroporos, respectivamente menores e maiores que 0,05 mm. Estes se manifestam sob as formas (RESENDE et al, 2002): (i) fendas: que apresentam grande relação comprimento/ largura; (ii) cavidades: que apresentam valores de comprimento e largura próximos; (iii) vesículas: que são poros isolados circulares e (iv) poros de empacotamento que, em estruturas granulares, podem ser poros de empacotamento livre, onde os grânulos se tocam livremente, ou poros de empacotamento compacto, onde os grânulos são soldados

No estudo micromorfológico, se faz o reconhecimento dos constituintes do solo, observando tamanho, forma, arranjo e orientação dos agregados e dos vazios que os separam, assim como a distribuição relativa do plasma em relação aos grãos do esqueleto (FITZPATRICK, 1971). A análise deve ser feita seguindo basicamente três níveis (FITZPATRICK, 1993): (i) descrição visual do componente; (ii) comparação visual do componente com referências conhecidas e (iii) medições diretas do componente (tamanho, abundância, área proporcional, cor, forma, textura da superfície, limites, variabilidade, orientação e padrões de distribuição).

A título de exemplo na Figura 5 se apresenta uma descrição micromorfológica de um Latossolo Roxo (MALTONI, 1994), indicando-se alguns elementos da sua estrutura. O solo em questão apresenta estrutura aglomerática com plasma poroso envolvendo poucos grãos de quartzo e com presença de minerais opacos, sendo que os poros apresentam-se isolados.

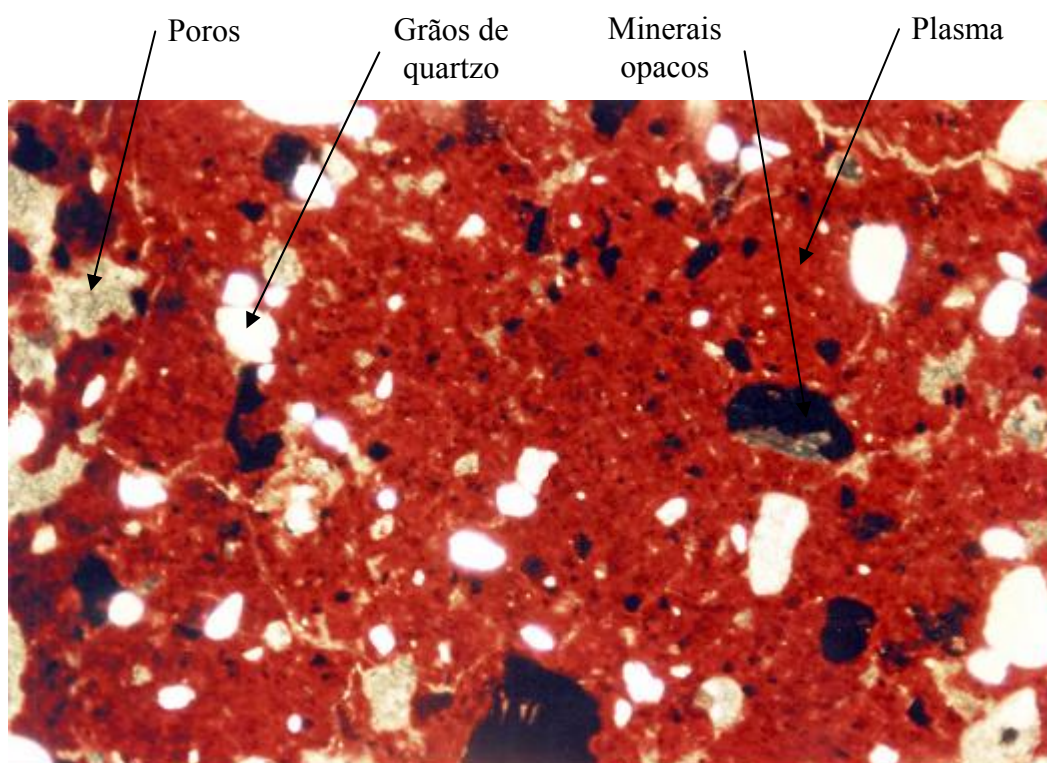


Figura 5. Exemplo de caracterização micromorfológica de uma fotomicrografia de um Latossolo Roxo, com aumento de 50 vezes (MALTONI, 1994).

Em geral, propriedades dos solos de interesse geotécnico têm íntimas relações com características das partículas (forma e arranjo) e forças entre elas. A compreensão, portanto, do comportamento dos solos passa pela consideração destes fatores

(MITCHEL, 1993), particularmente em solos compactados, onde a condição de solo não-saturado implica na existência de importantes interações entre ar-água e sólidos.

2.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Observações sucessivas de um mesmo fenômeno produzem, em geral, resultados diferentes, ou seja, apresentam variabilidade e, assim sendo, afirmações feitas a respeito destes envolverão sempre algum grau de incerteza. Comumente, os métodos estatísticos são ferramentas utilizadas na análise desta variabilidade. Eles permitem fazer uma afirmação probabilística sobre uma característica qualquer, ou seja, uma declaração que pode não estar correta, sendo, porém, possível calcular a probabilidade de a mesma estar errada e avaliar o grau de incerteza da afirmação.

Em engenharia são muito comuns problemas que requerem decisões sobre aceitar ou rejeitar uma determinada afirmação (hipótese). O procedimento para a tomada de decisão sobre a hipótese, chamado teste de hipóteses, consiste na aceitação ou rejeição da hipótese H_0 , onde:

- H_0 : parâmetro = valor de teste;
- H_1 (hipótese alternativa): parâmetro \neq valor de teste.

A probabilidade de aceitar H_0 sendo H_0 verdadeira é chamada de nível de significância do teste.

A comparação entre duas médias amostrais, por exemplo, pode ser avaliada pela aplicação de um teste t, assim como a avaliação de duas variâncias pelo teste F:

Teste t:

$$H_0: \mu_m = \mu_n ;$$

$$H_1: \mu_m \neq \mu_n$$

onde:

- μ_m e μ_n representam, respectivamente, as médias de duas populações m e n;
- σ_m e σ_n representam, respectivamente, as variâncias de duas populações m e n.

Teste F:

$$H_0: \sigma_m = \sigma_n ;$$

$$H_1: \sigma_m \neq \sigma_n .$$

Em situações onde a comparação seja entre três ou mais fatores uma alternativa comum é o emprego da análise de variância (ANOVA).

Experimentos de laboratório geralmente consistem na aplicação de procedimentos definidos pelo pesquisador e na avaliação dos resultados obtidos, sendo chamados de delineamentos experimentais. Quando o foco de um experimento é um único fator, as observações são tomadas aleatoriamente e o ambiente de realização dos experimentos é uniforme, o delineamento é dito inteiramente casualizado.

Para a realização da ANOVA de um delineamento experimental, utiliza-se um modelo estatístico, sendo linear o modelo utilizado em delineamentos experimentais inteiramente casualizados (MONTGOMERY, 2003):

$$Y_{ij} = m + t_i + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

onde:

- $i = 1, 2, \dots, t$ e $j = 1, 2, \dots, r$;
- Y_{ij} : representa a j -ésima observação no i -ésimo tratamento;
- m : média de todas as observações Y_{ij} do experimento;
- t_i : efeito do i -ésimo tratamento;
- ε_{ij} : efeito dos fatores não controlados na j -ésima observação no i -ésimo tratamento.

Para validade da análise de variância segundo o modelo apresentado na Equação 4, deve-se atender a algumas hipóteses básicas (STEEL et al, 1997):

- aditividade: ou seja os efeitos dos fatores que ocorrem no modelo devem ser aditivos;
- independência: os erros ou desvios ε_{ij} devidos a fatores não controlados devem ser independentes, o que equivale a dizer que os efeitos dos tratamentos são independentes;
- homogeneidade de variâncias: a variabilidade dos tratamentos deve ser semelhante;

- normalidade: os desvios ε_{ij} devem possuir uma distribuição normal de probabilidade, ou seja, os dados experimentais devem se ajustar a uma distribuição normal de probabilidade.

Quando se efetua uma ANOVA de um delineamento experimental inteiramente casualizado, testam-se as seguintes hipóteses: (i) H_0 : todos os tratamentos têm os mesmos efeitos, ou seja, $t_1 = t_2 = \dots = t_t$ e (ii) H_1 : pelo menos dois tratamentos têm efeitos diferentes. Para testar as hipóteses acima se procede aos cálculos mostrados na Tabela 4 partindo-se de um delineamento conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Valores observados de um experimento inteiramente casualizado com igual número de repetições.

Repetições	Tratamentos			
	1	2	...	t
1	Y_{11}	Y_{21}	...	Y_{t1}
2	Y_{12}	Y_{22}	...	Y_{t2}
...
j	Y_{1j}	Y_{2j}	...	Y_{tj}
Soma	$\sum_j Y_{1j} = Y_{1.}$	$\sum_j Y_{2j} = Y_{2.}$...	$\sum_j Y_{tj} = Y_{t.}$ $\sum_i Y_{i.} = Y_{..}$

A partir do valor calculado de F (F_{cal}) compara-se este com o valor tabelado de F (F_{tab}), considerando que $F_{tab} = F_{\alpha} (gl_t; gl_r)$; onde α é o nível de significância. Nessas condições, se $F_{cal} \geq F_{tab}$, rejeita-se H_0 ; sendo que do contrário aceita-se a mesma.

Quando a análise de variância indica que a hipótese nula deve ser rejeitada, ou seja, quando existem diferenças significativas entre os fatores analisados, testes de comparação múltipla entre médias podem ser utilizados, tais como contrastes ortogonais e testes de Fisher, Duncan, Tukey, entre outros.

Tabela 4. Análise de variância de um experimento inteiramente casualizado, com igual número de repetições.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados		Quadrado médio	F _{cal}
		Definição	Fórmula computacional		
Tratamentos	t - 1	$r \sum_i (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2$	$= \sum_i \frac{Y_{i.}^2}{r} - \frac{Y_{..}^2}{r t}$	$\frac{SQ_t}{gl_t}$	$\frac{QM_t}{QM_r}$
Resíduo	t (r - 1)	$\sum_{i,j} (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2$	= via subtração	$\frac{SQ_r}{gl_r}$	
Total	r t - 1	$\sum_{i,j} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2$	$= \sum_{i,j} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{r t}$		

SQ_t e SQ_r representam as somas de quadrados de tratamentos e de resíduos (ou erro), respectivamente. MQ_t e MQ_r representam os quadrados médios de tratamentos e de resíduos, respectivamente. gl_t e gl_r representam os graus de liberdade de tratamentos e resíduos, respectivamente.

Os contrastes ortogonais são de simples aplicação, porém devem ser definidos antes da realização dos experimentos, pois, do contrário, corre-se o risco de se montar contrastes que reflitam diferenças devidas ao erro aleatório e não devidas aos efeitos dos tratamentos aplicados. Aumentam-se, assim, as chances de aceitar uma hipótese sendo a mesma falsa, ou seja, aumenta-se o nível de significância do teste (MONTGOMERY, 2003). Nem sempre é fácil construir um contraste adequado e, muitas vezes, se deseja testar mais do que (i-1) comparações (máximo possível com contraste ortogonal, sendo i o número de tratamentos), aplicando-se para tanto testes padronizados.

Os testes de Fisher, Duncan ou Tukey se prestam a comparações entre todos os pares de médias possíveis, sendo que nos dois primeiros aumentam-se as chances de se aceitar uma hipótese sendo a mesma falsa, na medida em que se aumenta o número de médias envolvidas; já no teste de Tukey, mantém-se o nível de significância fixo independente do número de médias analisadas, sendo, portanto, mais conservador (GOMES, 1985).

Em comparações múltiplas utilizando o teste Tukey as hipóteses avaliadas são as seguintes: (i) H₀: m_i = m_{i'}, ou seja, as médias dos tratamentos i e i' são iguais e (ii) H₁: m_i ≠ m_{i'}, ou seja, as médias dos tratamentos i e i' são diferentes. Ou ainda: (i) H₀: m_i - m_{i'} = 0 e (ii) H₁: m_i - m_{i'} ≠ 0.

Para avaliação das hipóteses calcula-se a diferença mínima significativa (DMS) do teste:

$$\Delta = q \sqrt{\frac{QM_r}{j}} \quad (5)$$

onde Δ é a diferença mínima significativa e q é a amplitude total estudentizada, cujo valor é tabelado, $q_\alpha (i; gl_r)$. Se o contraste $C (m_i - m_{i'}) \geq \Delta$, rejeita-se H_0 , do contrário aceita-se a mesma.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. SOLOS

Este estudo foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), utilizando-se dois solos com as seguintes características:

- Solo 1: é um solo residual maduro classificado, pedologicamente, como Latossolo Vermelho-Amarelo. Ele tem grande expressão territorial no Brasil e apresenta um horizonte B latossólico de tonalidade amarelada, estrutura granular forte e em blocos bem individualizados, aspecto muito poroso, com textura argilo-areno-siltosa, sendo classificado, quanto à plasticidade, como A-7-5 (20), segundo a classificação TRB. Segundo Trindade (2006) na fração argila desse solo predominam os minerais caulinita e goethita, embora sejam encontrados também traços de gibbsita. Segundo esse autor, quando compactado tem a tendência à coalescência dos microagregados, resultando em uma estrutura altamente coesa e compacta, destacando-se que o esforço de compactação resulta no aparecimento de fissuras ao longo de linhas de fraqueza, formando estruturas fraturadas, preenchidas por plasma argiloso. O local de coleta da amostra foi um talude de corte localizado no lado direito da rodovia que liga Viçosa à Paula Cândido, próximo à Usina

de Pré-Misturado a Frio da cidade de Viçosa, MG, conforme ilustra a Figura 6a;

- Solo 2: é um material de um solo jovem, Argissolo Câmbico (horizonte C, saprolito), oriundo de um perfil de intemperismo de solos desenvolvidos de gnaiss do Pré-Cambriano. Ele apresenta coloração acinzentada, com textura areno-silto-argilosa, sendo classificado como A-2-4 (0), pelo TRB. Segundo Trindade (2006) suas frações areia e silte são constituídas basicamente de quartzo, mica e feldspato, predominando em sua fração argila a caulinita, com traços de goethita, bem como se apresenta com uma estrutura grânica ponteadada (*bridge structure*, ou seja, com “pontes” argilosas ligando os grãos) envolvida em plasma escasso. Como destaca Azevedo (1999) este solo apresenta, também, pseudomorfos caulíníticos os quais quando submetidos ao esforço de compactação são reorientados formando linhas paralelas normais à direção de aplicação do esforço de compactação. O local de coleta da amostra foi um talude de corte localizado na Vila Secundino, no Campus da Universidade Federal de Viçosa, como se visualiza na Figura 6b.



(a) Solo 1



(b) Solo 2

Figura 6. Locais de coleta das amostras de solos.

Na Tabela 5, apresenta-se a caracterização geotécnica dos solos e na Figura 7 as respectivas curvas granulométricas.

Tabela 5. Caracterização geotécnica dos solos 1 e 2, realizada no presente trabalho

Solo	Argila ¹ %	Silte ¹ %	Areia ¹ %	LL %	IP ² %	δ^3 g/cm ³
Solo 1	66	4	30	74	28	2,99
Solo 2	7	25	68	NL	NP	2,78

¹ Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995): argila ($\phi \leq 0,002$ mm), silte ($0,002 < \phi \leq 0,06$ mm) e areia ($0,06 < \phi \leq 2$ mm) e ensaio realizado segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984d).

² LL e LP realizados, respectivamente, segundo as Normas NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 1984a e ABNT, 1984c).

³ Massa específica dos sólidos, segundo a NBR 6508 (ABNT, 1984b).

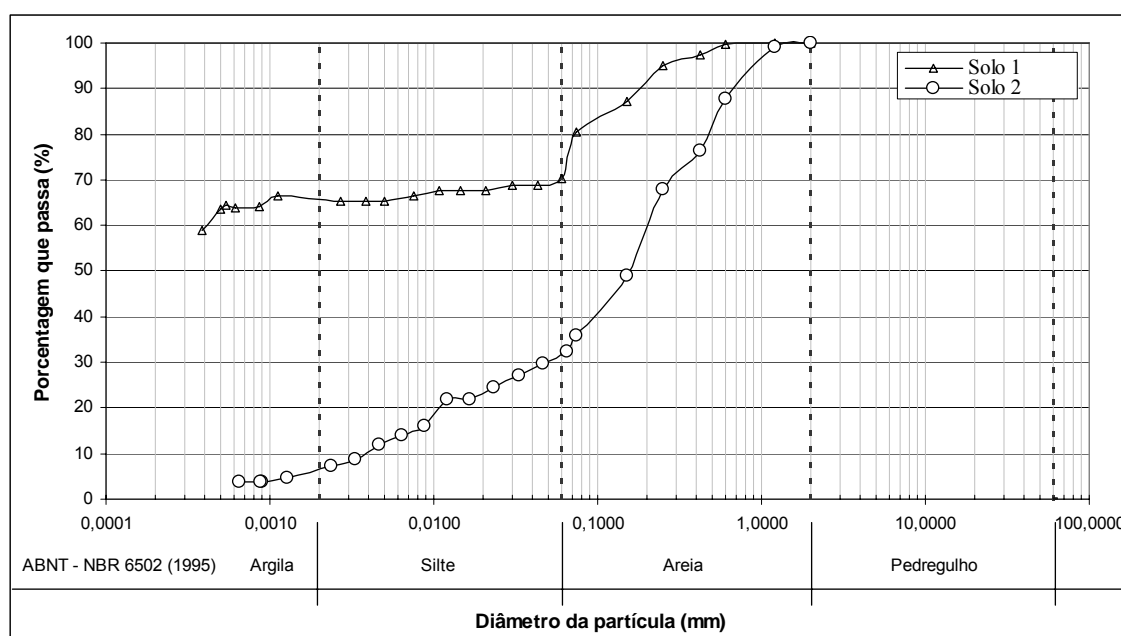


Figura 7. Curvas granulométricas dos solos 1 e 2.

3.2. MÉTODOS

O estudo da influência do método de compactação, diâmetro do cilindro e número de camadas dos corpos-de-prova na curva de compactação dos solos e, conseqüentemente, nas suas estruturas foi dirigido a cada um destes tópicos, isoladamente, adotando-se em todas as análises a energia de compactação do ensaio Proctor normal.

Na busca de se reproduzir condições de compactação no campo, adotou-se o critério de representar as curvas de compactação dos solos através de corpos-de-prova moldados nos seguintes teores de umidade do Proctor normal: ótimo (h_{ot}), ótimo menos 3% ($h_{ot} - 3\%$) e ótimo mais 2% ($h_{ot} + 2\%$), trabalhando-se com nove repetições para cada teor de umidade.

Além dos resultados obtidos para as curvas de compactação, se empregaram, também, como parâmetros para a avaliação de mudanças estruturais nos solos, os resultados de ensaios de compressão não confinada realizados nas umidades já referidas, considerando-se nove repetições.

Incorporou-se, também, ao estudo da influência do método de compactação na estrutura dos solos os resultados de análises micromorfológicas desenvolvidas em microscópio ótico, empregando-se lâminas extraídas de corpos-de-prova compactados.

A compactação na modalidade dinâmica foi realizada segundo a NBR 7182/86, (ABNT, 1986). Considerando-se a média de nove repetições das curvas de compactação obtidas no modo dinâmico para cada solo, obteve-se a massa específica aparente seca para a realização das compactações estáticas, procurando assim, repetir a energia do Proctor normal nos ensaios de compactação estática.

Apresenta-se, nos itens 3.2.1 a 3.2.3, o detalhamento dos tópicos desenvolvidos nesta pesquisa, cujo resumo encontra-se ilustrado na Tabela 6 e na Figura 8.

Tabela 6. Resumo dos ensaios realizados nos estudos da influência da modalidade de compactação, diâmetros dos cilindros e número de camadas dos corpos-de-prova na estrutura dos solos 1 e 2

Aspecto estudado	Modalidade de compactação	Diâmetro do cilindro	Número de camadas	Análise micromorfológica
Método de compactação	Dinâmica	100 mm ¹	3	Sim ⁴
	Estática	100 mm ¹	3	Sim ⁴
		100 mm ¹	3	Sim ⁴
Diâmetro do cilindro	Estática	73 mm ²	3	Não
		35 mm ³	3	Não
			1	Não
Número de camadas	Estática	73 mm ²	2	Não
			3	Não

¹ Cilindro Proctor.

² Cilindro tripartido (altura = 150 mm).

³ Cilindro tripartido (altura = 80 mm).

COMPACTAÇÃO DE SOLOS: INFLUÊNCIA DE MÉTODOS E DE PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO NA ESTRUTURA DOS SOLOS

28

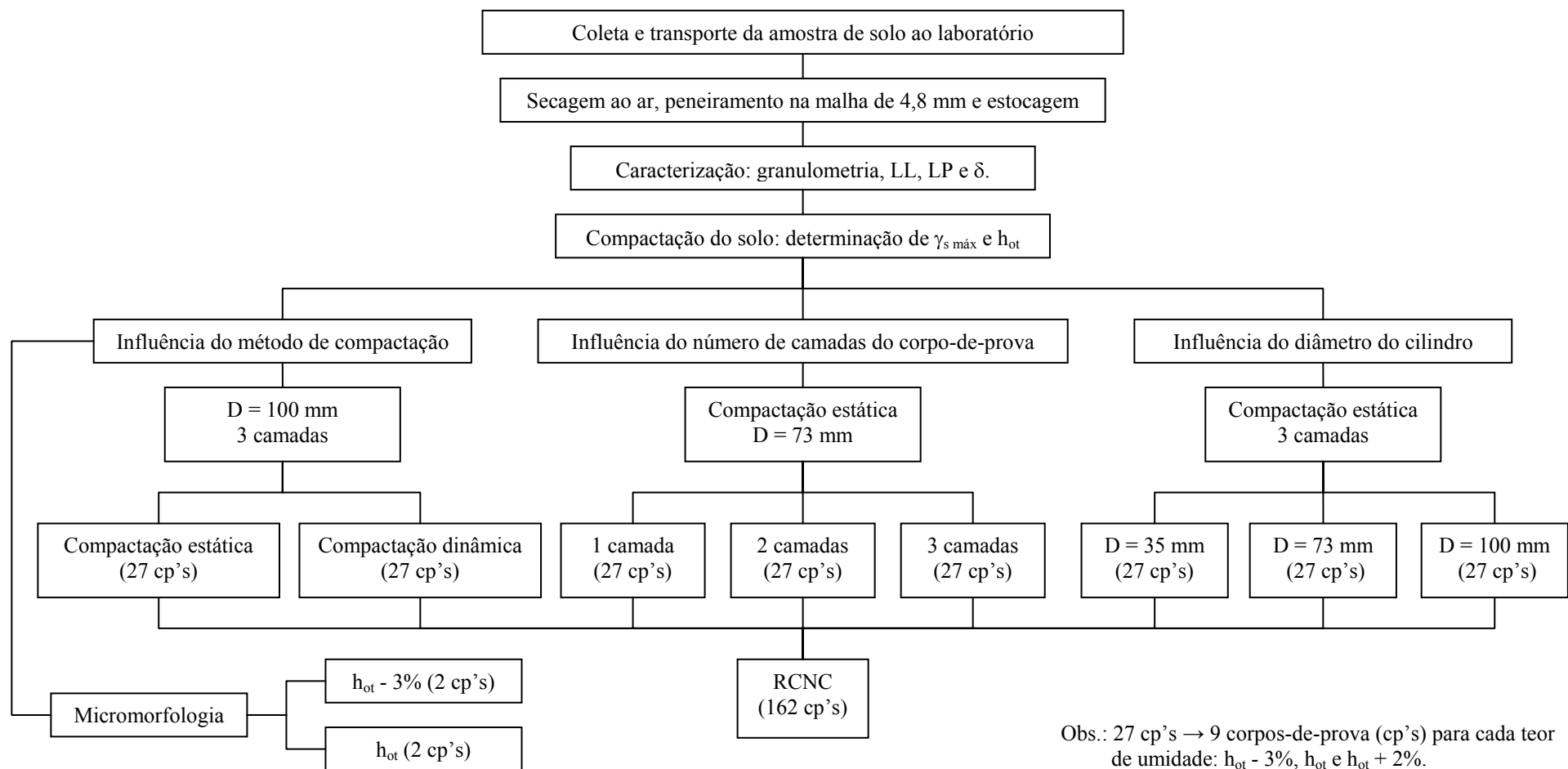


Figura 8. Fluxograma dos ensaios realizados para cada solo

3.2.1. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO NA ESTRUTURA DOS SOLOS

- Modalidades de compactação empregadas: estática e dinâmica.
- Número de camadas do corpo-de-prova: 3.
- Molde de compactação: molde do ensaio de compactação Proctor, com diâmetro de 100 mm.
- Elementos de análise: curvas geradas em cada modalidade de compactação representadas por corpos-de-prova moldados nos teores de umidade h_{ot} , $h_{ot} - 3\%$ e $h_{ot} + 2\%$ e resultados de ensaios de compressão não confinada, considerando-se nove repetições.
- Ensaios de compressão não confinada.
- Análises micromorfológicas:
- teores de umidade de moldagem dos corpos-de-prova: h_{ot} e $h_{ot} - 3\%$, determinados nos ensaios de compactação realizados na energia do ensaio Proctor normal;
- ensaios para avaliação de mudanças estruturais: trabalhou-se com um total de oito (8) lâminas confeccionadas da seção média de oito corpos-de-prova, sendo quatro de cada solo, compactados na energia do ensaio Proctor normal, nos teores de umidade h_{ot} e $h_{ot} - 3\%$;
- as análises micromorfológicas seguiram o seguinte procedimento:
 - os corpos-de-prova compactados foram colocados em estufa a 35°C , por dois dias. Em seguida foram impregnados com resina Revopal T-208 com corante Azul de Bayer, em mistura 1:1 com monômero de estireno, adicionando 6 gotas de catalisador para cada 200 mL de mistura;
 - após a impregnação, as lâminas polidas (seções-finas) foram confeccionadas nas dimensões de 2,5 x 4,7 cm em faces polidas no sentido perpendicular à superfície do cilindro, como ilustra a

Figura 9, e analisadas em microscópio petrográfico OLYMPUS DX-40 com câmera digital acoplada (NIKON Coopix);

- as descrições de microestrutura e porosidade seguiram as recomendações de FitzPatrick (1993), com ênfase em observações de feições micromorfológicas e mineralógicas de importância geotécnica.
- a partir das fotomicrografias obtidas em microscópio, foram realizadas medidas quantitativas de porosidade, plasma e grãos, utilizando o *software* QUANTIPORO (FERNANDES FILHO e VIANA, 2001), desenvolvido no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Trabalhou-se com a média dos resultados obtidos por meio do *software* QUANTIPORO, empregando-se de 5 a 8 fotomicrografias obtidas em cada lâmina.

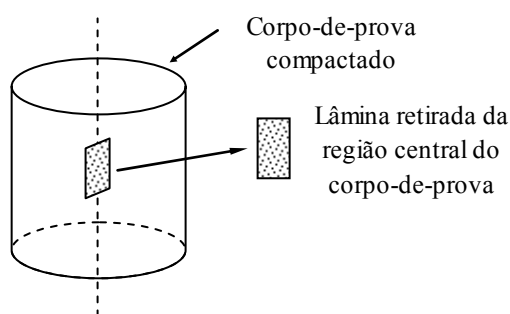


Figura 9. Figura esquemática indicando a região de retirada das lâminas analisadas

3.2.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE CAMADAS DO CORPO-DE-PROVA

- Modalidade de compactação: estática.
- Diâmetro do cilindro de compactação: cilindro tripartido de diâmetro 73 mm.
- Número de camadas dos corpos-de-prova: 1, 2 e 3 camadas.
- Elementos de análise: resultados de ensaios de compressão não confinada, considerando-se nove repetições.

3.2.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO CILINDRO

- Modalidade de compactação: estática.
- Diâmetros dos cilindros de compactação: (i) cilindro Proctor com diâmetro de 100 mm e (ii) dois cilindros tripartidos, respectivamente, com diâmetros 73 mm e 3,5 mm.
- Elementos de análise: resultados de ensaios de compressão não confinada, considerando-se nove repetições.

3.2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando-se de testes t e F para avaliação da influência do método de compactação e de análise de variância (ANOVA) para avaliação da influência do número de camadas e do diâmetro na compactação dos solos, sendo que as comparações múltiplas, nas ANOVA's realizadas, foram realizadas utilizando o teste Tukey. As análises foram realizadas utilizando o *software* STATISTICA 6.0. Destaca-se que foi adotado um nível de 5% de probabilidade em todas as análises.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo da influência dos métodos de compactação, diâmetro do cilindro e número de camadas na estrutura dos solos foi realizada com base na análise de curvas de compactação e de resultados de ensaios de compressão não confinada realizados em corpos-de-prova compactados em determinadas umidades, na energia do ensaio Proctor normal. Também foram incorporados os resultados de análise micromorfológica desenvolvida em microscópio ótico, empregando-se lâminas extraídas de corpos-de-prova compactados.

O programa de ensaios abrangeu a realização de ensaios de caracterização geotécnica, compactação, compressão não confinada e análise micromorfológica, dando-se, também, aos dados obtidos nos ensaios de compactação e de compressão não confinada um tratamento estatístico, com a finalidade de se inferir sobre a influência dos parâmetros de interesse na resposta mecânica dos solos.

4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Na Tabela 7, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos, evidenciando, para o Solo 1, uma granulometria argilo-areno-siltosa e, para o Solo 2, areno-silto-argilosa. Com relação à plasticidade, observa-se uma diferença significativa entre ambos os materiais, resultando em classificações TRB como A-7-5 (20), para o Solo 1, e A-2-4 (0), para o Solo 2.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados no presente trabalho

Solo	Argila ¹ %	Silte ¹ %	Areia ¹ %	LL %	IP %	δ^2 g/cm ³	$\gamma_{s \text{ máx}}$ g/cm ³
Solo 1	66	4	30	74	28	29,28	14,18
Solo 2	7	25	68	NL	NP	27,28	17,42

¹ Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995): argila ($\phi \leq 0,002$ mm), silte ($0,002 < \phi \leq 0,06$ mm) e areia ($0,06 < \phi \leq 2$ mm).

² Massa específica dos sólidos.

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

As Tabelas 8 e 9 sintetizam, respectivamente, os resultados dos ensaios de compactação realizados nos solos 1 e 2 e os teores de umidade utilizados na moldagem dos corpos-de-prova, na energia do Proctor normal, respeitando-se o desvio máximo de $\pm 0,3\%$.

Tabela 8. Parâmetros ótimos de compactação dos Solos 1 e 2, segundo resultados de ensaios realizados na energia Proctor normal

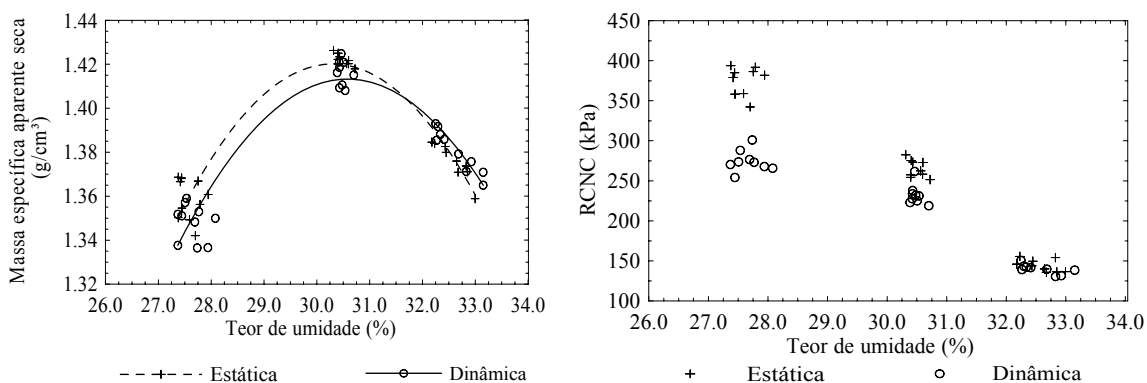
Solo	h_{ot} %	$\gamma_{smáx}$ g/cm ³
Solo 1	30,5	1,45
Solo 2	14,9	1,78

Tabela 9. Teores de umidade empregados na moldagem dos corpos-de-prova

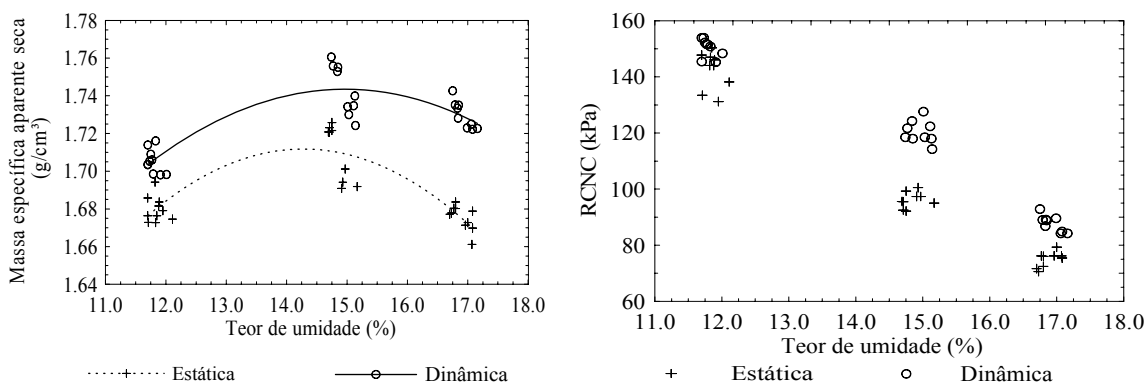
Solo	$h_{ot} - 3\%$	h_{ot}	$h_{ot} + 2\%$
Solo 1	27,5	30,5	32,5
Solo 2	11,9	14,9	16,9

4.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO NA CURVA DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

A Figura 10 mostra as curvas de compactação e as resistências à compressão não confinada (RCNC) obtidas para os solos 1 e 2, empregando-se, respectivamente, as modalidades de compactação estática e dinâmica.



(a) Solo 1



(b) Solo 2

Figura 10. Curvas de compactação e resistências à compressão não confinada para os solos 1 e 2.

As Tabelas 10 e 11 mostram os parâmetros estatísticos básicos dos resultados obtidos de γ_s e RCNC, respectivamente para os solos 1 e 2.

Tabela 10. Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica

Parâmetros avaliados	Estatísticas	h _{ot} - 3%	h _{ot}	h _{ot} + 2%
		Compactação estática		
γ_s	\bar{x} g/cm ³	1,36	1,42	1,38
	s g/cm ³	9,42E-03	2,62E-03	8,24E-03
	CV %	0,69	0,18	0,60
RCNC	\bar{x} kPa	375,30	265,41	144,23
	s kPa	17,82	10,90	7,66
	CV %	4,75	4,11	5,31
Compactação dinâmica				
γ_s	\bar{x} g/cm ³	1,35	1,42	1,38
	s g/cm ³	7,94E-03	5,83E-03	8,39E-03
	CV %	0,59	0,41	0,61
RCNC	\bar{x} kPa	274,54	232,38	139,73
	s kPa	13,44	12,44	6,03
	CV %	4,90	5,36	4,32

Tabela 11. Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica

Parâmetros avaliados	Estatísticas	h _{ot} - 3%	h _{ot}	h _{ot} + 2%
		Compactação estática		
γ_s	\bar{x} g/cm ³	1,68	1,71	1,68
	s g/cm ³	7,05E-03	15,05E-03	6,70E-03
	CV %	0,42	0,88	0,40
RCNC	\bar{x} kPa	142,46	96,16	74,90
	s kPa	6,67	2,81	2,76
	CV %	4,69	2,92	3,69
Compactação dinâmica				
γ_s	\bar{x} g/cm ³	1,71	1,74	1,73
	s g/cm ³	6,67E-03	13,20E-03	7,21E-03
	CV %	0,39	0,76	0,42
RCNC	\bar{x} kPa	150,35	120,35	87,73
	s kPa	3,29	4,02	2,93
	CV %	2,19	3,34	3,33

Observando os resultados apresentados na Figura 10 e nas Tabelas 10 e 11, nota-se que a dispersão dos resultados obtidos é pequena. Os valores dos coeficientes de variação (CV) chegam ao máximo de 0,88%, para o parâmetro γ_s (Solo 2), e 5,36%, para o parâmetro RCNC (Solo 1). Estes resultados indicam que a comparação entre as diferentes modalidades de compactação analisadas, não deve ser afetada por discrepâncias entre desvios padrão.

Da Figura 11 tem-se que as diferenças relativas entre γ_s médios obtidos utilizando as modalidades de compactação estática e dinâmica (tomando esta como referência), são pequenas, não ultrapassando 1% para o Solo 1 e 3% para o Solo 2. No entanto, a Tabela 12 mostra que existem diferenças estatisticamente significativas, a 5% de probabilidade, entre as modalidades de compactação estática e dinâmica, exceto para o Solo 1 no teor de umidade $h_{ot} + 2\%$. Quanto ao Solo 1, essas diferenças se devem, provavelmente, a pequenas variações ocorridas na massa úmida do solo da ordem de 0,5% e quanto ao Solo 2, a variações de altura dos corpos-de-prova. Após extração do cilindro de compactação, observou-se que os corpos-de-prova compactados estaticamente apresentaram alturas (respectivamente para os teores de umidade $h_{ot} - 3\%$, h_{ot} e $h_{ot} + 2\%$) 1,5%, 2,2% e 2,8% superiores aos corpos-de-prova compactados dinamicamente.

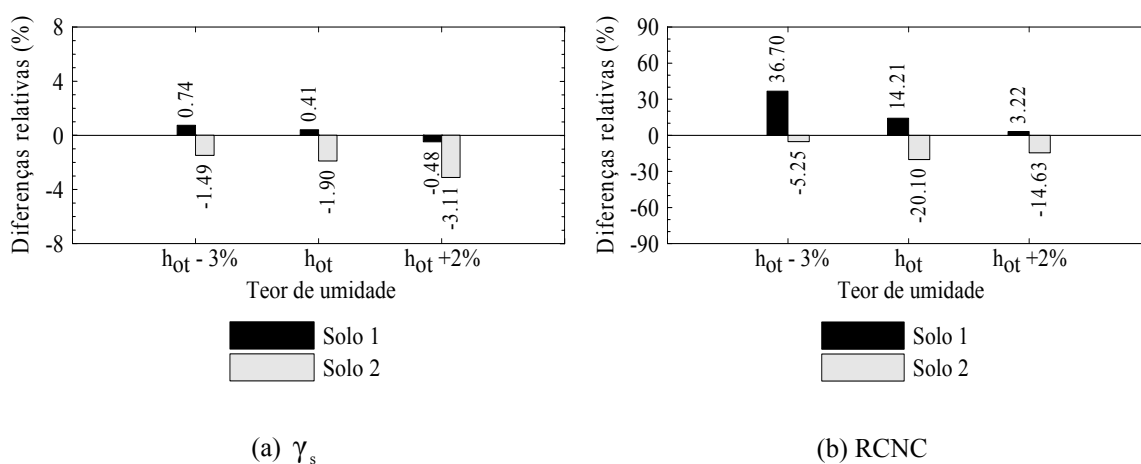


Figura 11. Diferenças relativas entre médias obtidas para os parâmetros γ_s e RCNC dos solos 1 e 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica.

Com relação aos valores de RCNC médios, as diferenças relativas são expressivas, se aproximando de 37% para o Solo 1, e de 20%, para o Solo 2. A Tabela

12 confirma estes resultados mostrando que, a 5% de probabilidade, a modalidade de compactação afeta significativamente o parâmetro RCNC, exceto para o Solo 1 ($h_{ot} + 2\%$).

Tabela 12. Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para os parâmetros γ_s e RCNC dos solos 1 e 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica

Parâmetros avaliados	$h_{ot} - 3\%$	h_{ot}	$h_{ot} + 2\%$
Solo 1			
γ_s	*	*	ns
RCNC	**	**	ns
Solo 2			
γ_s	**	**	**
RCNC	**	**	**

(*) e (**) indicam a ocorrência de diferenças significativas respectivamente a 5% e 1% e (ns) indica que não existem diferenças estatisticamente significativas a 5% de probabilidade.

Considerando os dados apresentados nas Figuras 10 e 11 e Tabelas 10 e 11 e tomando os resultados da compactação dinâmica como referência, observa-se que, para fins práticos de engenharia, o emprego da compactação estática ocasionou pequena variação no parâmetro γ_s dos solos, para os três teores de umidade analisados; porém, essas diferenças foram significativas no parâmetro RCNC, evidenciando as mudanças introduzidas nas estruturas dos solos.

Com relação às variações ocorridas no parâmetro RCNC, observa-se a existência de comportamentos diferenciados nos solos 1 e 2. Para o Solo 1 o uso da compactação estática levou a aumento na resistência mecânica, já para o Solo 2 levou à queda da mesma. Explicações para esses fatos podem estar relacionadas às particularidades pedológico-geotécnicas dos solos 1 e 2, embora sejam ambos os solos residuais originários de gnaisses do Pré-Cambriano.

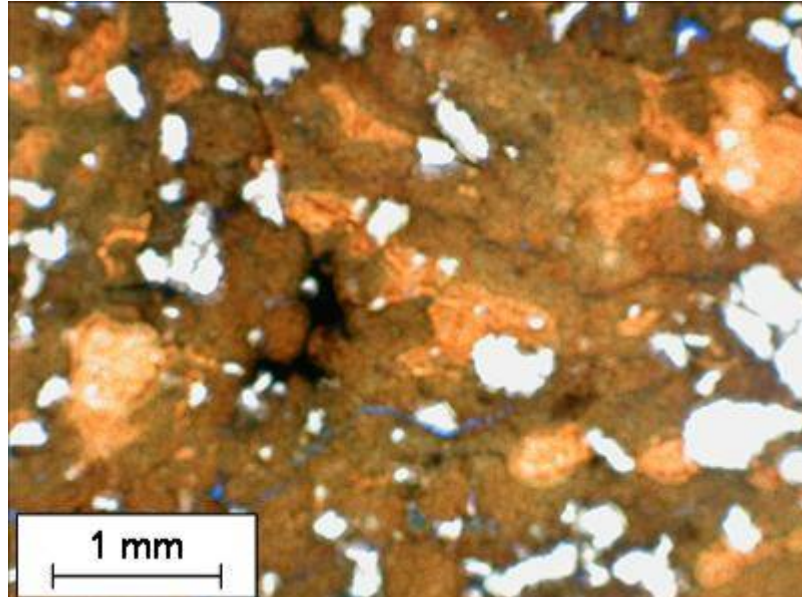
O Solo 1 foi coletado no horizonte B do perfil e exibe textura argilo-arenosiltosa, com fração argila significativa (66%, 0). Geotecnicamente é classificado como residual maduro e pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo, o que evidencia a ocorrência de processos pedogenéticos avançados na sua formação, bem como apresenta estrutura em grânulos bem individualizados e aspecto bastante poroso, podendo apresentar potencial de colapso para tensões mais elevadas, como destaca

Azevedo (1999). Outro aspecto de interesse é que, no Solo 1 podem predominar ligações interpartículas de caráter tal que, sob a ação de forças externas, especialmente as de natureza dinâmica, são afetadas ou destruídas, levando a situações de ocorrência de menores resistências mecânicas. Certamente, essas considerações, se não aplicáveis em sua totalidade ao presente caso, em que se observa maior eficiência da compactação estática no ganho de resistência mecânica do Solo 1, podem fornecer subsídios para a adequada compreensão do fato de que a compactação dinâmica produziu maior distúrbio nas ligações interpartículas, ao nível de agregados de partículas, do que a estática e, conseqüentemente, gerou queda na RCNC do material em análise. Esse comportamento pode-se enquadrar naquele descrito por Bueno et al. (1992), quando abordam o efeito deletério da compactação por impacto, aqui denominada dinâmica, em um Latossolo Vermelho-Amarelo da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, em comparação com a resposta mecânica deste mesmo solo nas condições naturais de campo.

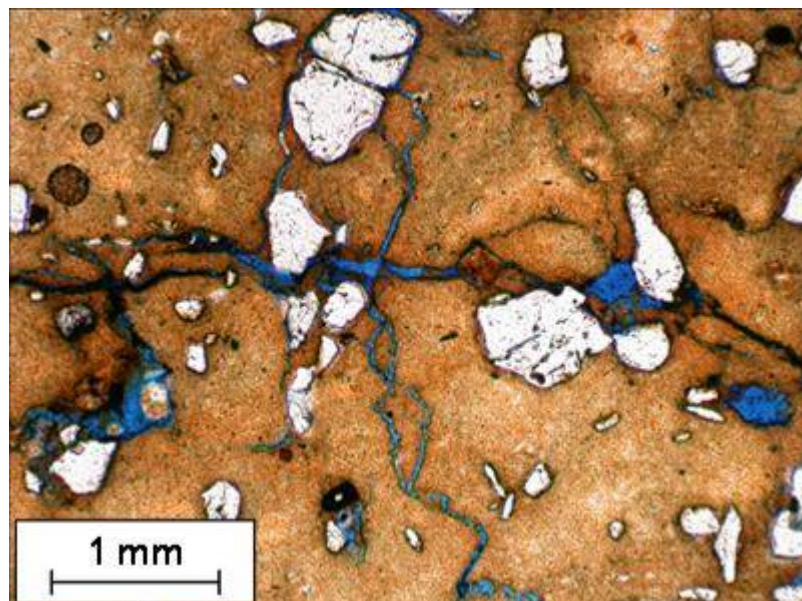
O Solo 2 foi coletado no horizonte C do perfil e apresenta textura areno-silto-argilosa, com fração areia considerável (68%, 0), sendo geotecnicamente classificado como residual jovem (saprolito). É de se esperar que a influência da compactação dinâmica seja mais significativa no Solo 2, mais arenoso, haja visto a influência significativa da vibração na acomodação gradativa das partículas e, conseqüentemente, na eficiência do processo de compactação, como enfatizam Rico e Del Castillo (1976), Guedes de Melo (1985) e Hilf (1992).

4.3.1. MICROMORFOLOGIA

A seguir, apresentam-se os resultados da análise micromorfológica realizada a partir de lâminas obtidas dos solos 1 (Figura 14) e 2 (Figura 17), conforme descrito no Capítulo 3, que foram extraídas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente nos teores de umidade $h_{ot} - 3\%$ e h_{ot} . As Figuras 12 e 13, Solo 1, e Figuras 15 e 16, Solo 2, são representativas das fotomicrografias analisadas e ilustram esses resultados.

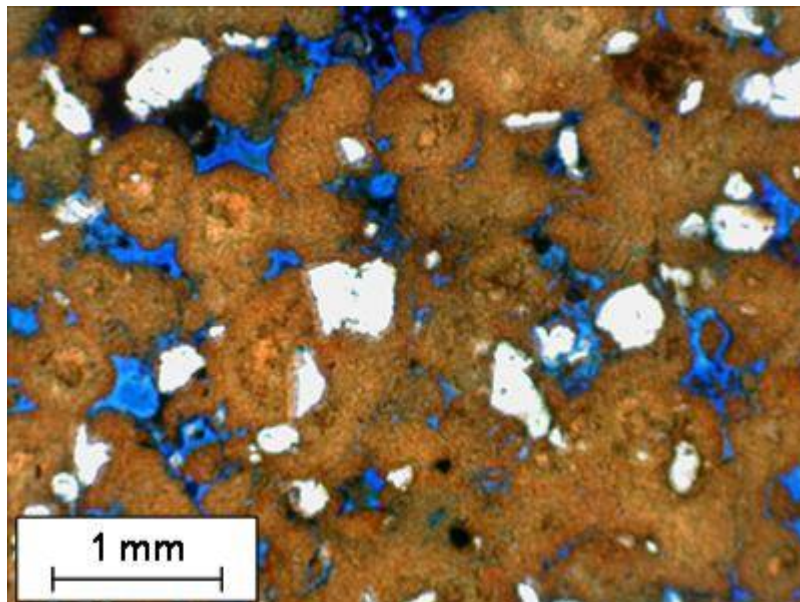


(a) Compactação estática: h_{ot}

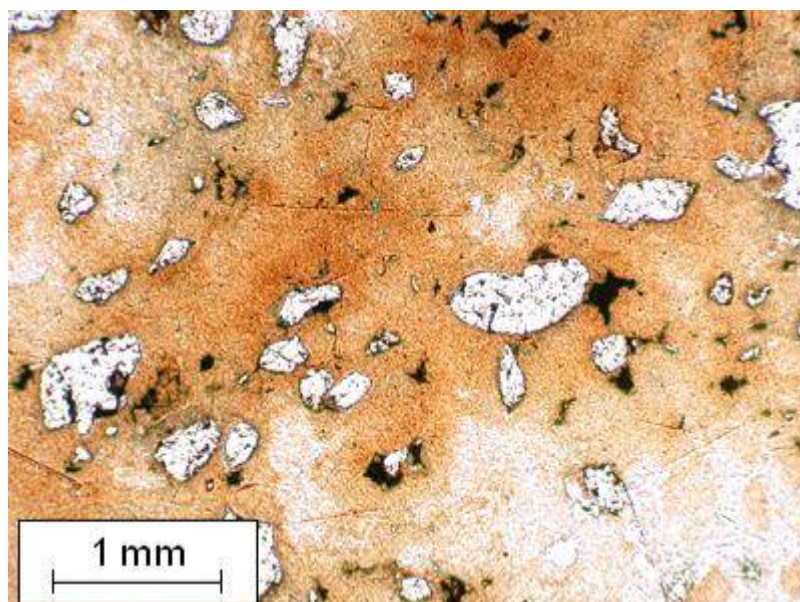


(b) Compactação dinâmica: h_{ot}

Figura 12. Fotomicrografias realizadas em lâminas do Solo 1 obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente no teor de umidade h_{ot} .

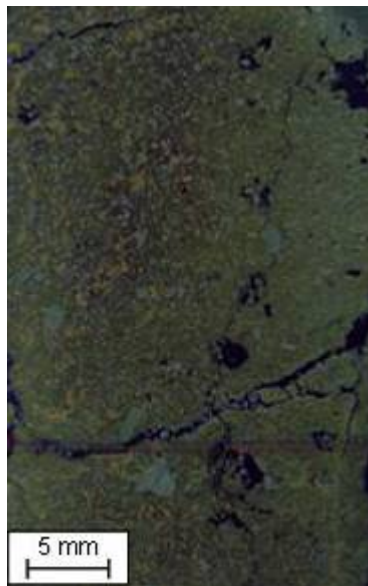


(a) Compactação estática: $h_{ot} - 3\%$

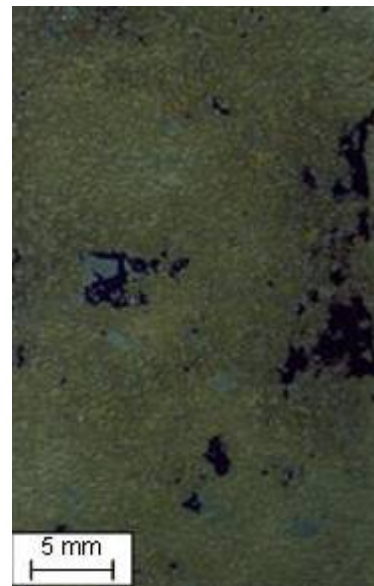


(b) Compactação dinâmica: $h_{ot} - 3\%$

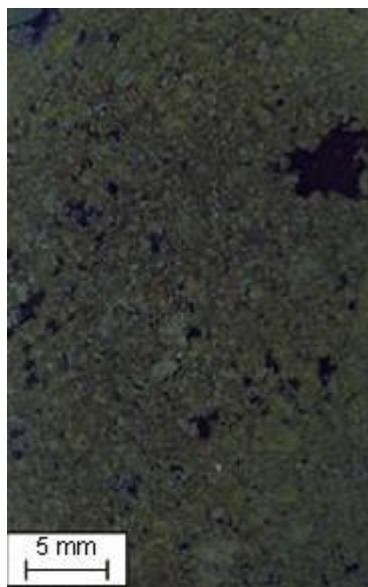
Figura 13. Fotomicrografias realizadas em lâminas do Solo 1 obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente no teor de umidade $h_{ot} - 3\%$.



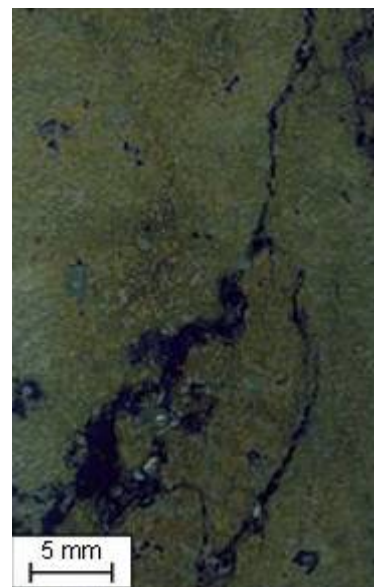
(a) Compactação estática: h_{ot}



(b) Compactação dinâmica: h_{ot}

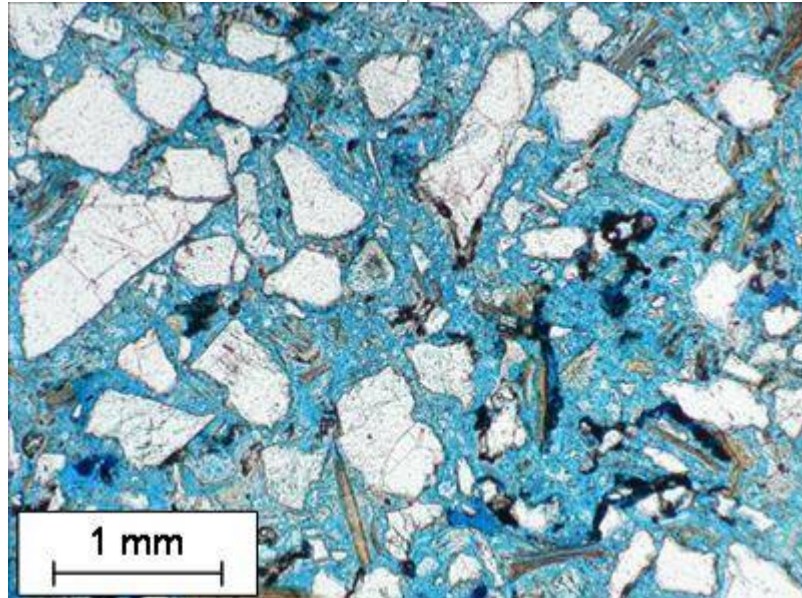


(c) Compactação estática: $h_{ot} - 3\%$

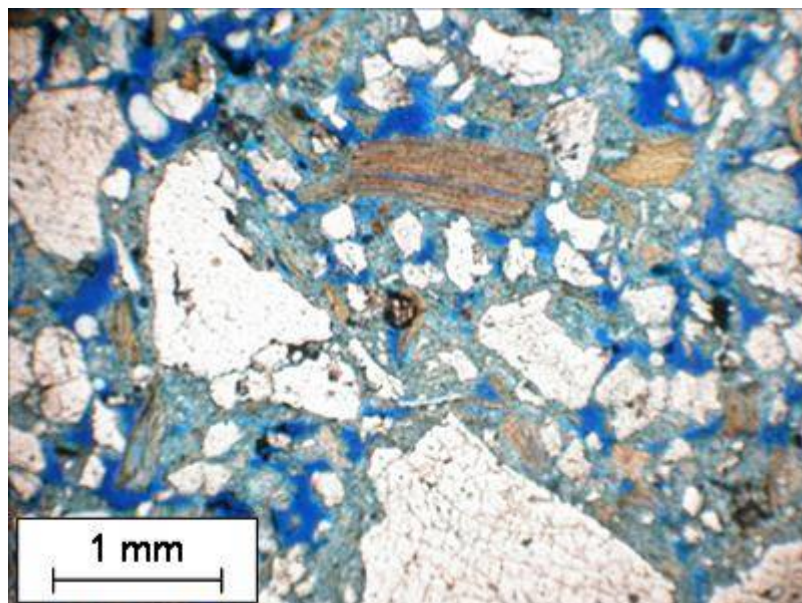


(d) Compactação dinâmica: $h_{ot} - 3\%$

Figura 14. Imagens escaneadas do Solo 1, empregando-se lâminas obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente.

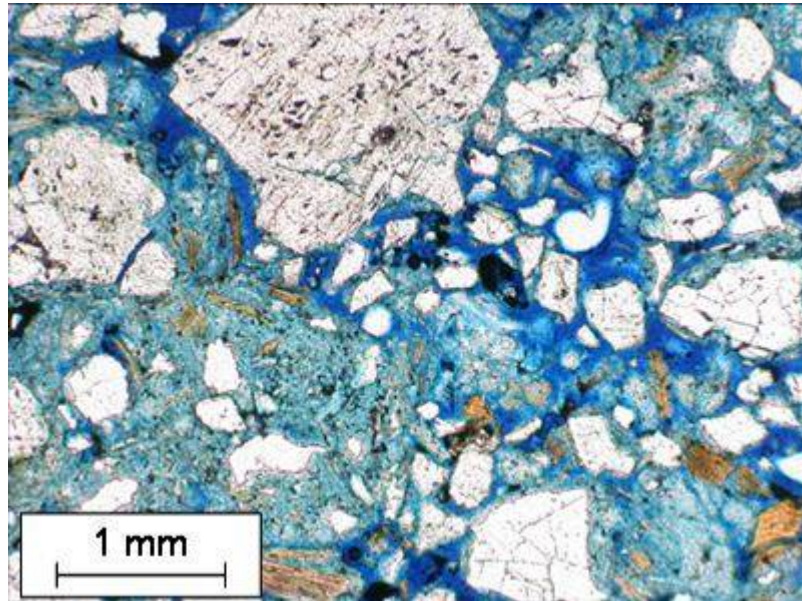


(a) Compactação estática: hot

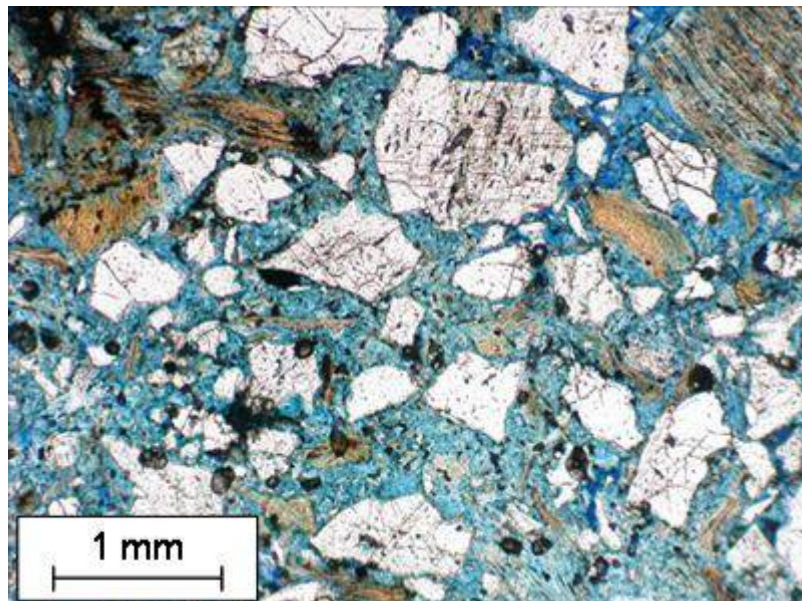


(b) Compactação dinâmica: h_{ot}

Figura 15. Fotomicrografias realizadas em lâminas do Solo 2 obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente no teor de umidade h_{ot} .



(a) Compactação estática: $h_{ot} - 3\%$



(b) Compactação dinâmica: $h_{ot} - 3\%$

Figura 16. Fotomicrografias realizadas em lâminas do Solo 2 obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente no teor de umidade $h_{ot} - 3\%$.



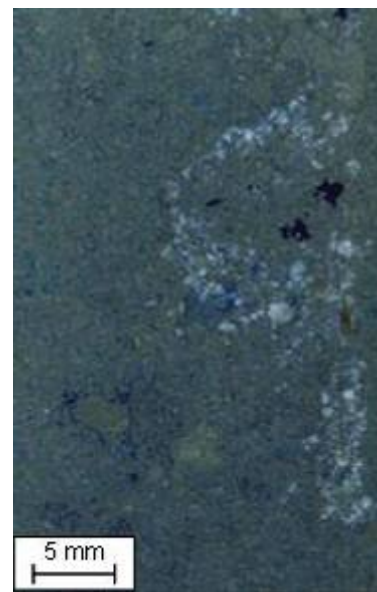
(a) Compactação estática: h_{ot}



(b) Compactação dinâmica: h_{ot}



(c) Compactação estática: $h_{ot} - 3\%$



(d) Compactação dinâmica: $h_{ot} - 3\%$

Figura 17. Imagens escaneadas do Solo 2, empregando-se lâminas obtidas de corpos-de-prova compactados estaticamente e dinamicamente.

Das observações micromorfológicas realizadas na amostra do Solo 1, depreende-se que o mesmo apresenta estrutura aglomerática, com plasma argiloso microestruturado compactado. Os grãos são exclusivamente quartzosos sendo a quase

totalidade de não fraturados e a maioria são grãos arredondados. Apresenta, ainda, minerais opacos de magnetita e titânio (aproximadamente 5%).

Conforme ilustra a Figura 12a, na umidade ótima, a amostra compactada estaticamente apresenta alguns traços de microagregação original. A porosidade é baixa (3%), com formação de vazios isolados e porosidade fissural e orientada. Nota-se, também, na Figura 14a, a formação de uma cunha de ruptura na direção de aplicação do esforço de compactação. Por outro lado, a amostra compactada dinamicamente apresenta poucos traços de microagregação original, com porosidade quase toda perdida (1,5%) e pouca porosidade fissural, como ilustra a Figura 12b.

No teor de umidade $h_{ot} - 3\%$, a compactação estática (Figura 13a) resultou em um material ainda com marcantes traços de microagregação original, porosidade de 11% e vazios ainda com alguma interligação. Por outro lado, a compactação dinâmica (Figura 13b) resultou em um solo com plasma argiloso microestruturado parcialmente soldado (coalescido). Na Figura 14d, nota-se também, a ocorrência de uma cunha de ruptura, resultando em subunidades não compactadas de forma homogênea. A região da cunha apresenta porosidade fissural e orientada com poros de empacotamento dentro da mesma, e fora desta porosidade quase toda perdida (aproximadamente 2%).

A maior porosidade obtida na compactação estática e o aparecimento da cunha de ruptura na compactação dinâmica podem explicar a diferença de resistência encontrada entre os dois métodos no teor de umidade $h_{ot} - 3\%$. A maior porosidade da amostra compactada estaticamente contribuiria para a criação de tensões capilares que resultariam em incremento na resistência do solo, ao passo que as fissuras contribuiriam para redução da resistência mecânica da amostra compactada dinamicamente. É de se notar ainda que, observando a Figura 10a, pode-se ajustar uma reta passando pela nuvem de pontos correspondentes às resistências obtidas com o método estático de compactação; no entanto, não é possível fazer o mesmo para o conjunto de dados obtidos via método dinâmico, evidenciando uma queda na RCNC no teor de umidade $h_{ot} - 3\%$. Por outro lado, na umidade ótima, a diferença de resistência estaria ligada à maior porosidade da amostra compactada estaticamente, embora a mesma apresente fraturas que implicariam em queda de resistência.

O Solo 2 apresenta, de maneira geral, estrutura grânica, sendo os grãos constituídos de quartzo fraturado e não-fraturado, com abundantes pseudomorfos de mica e plasma claro caulínítico.

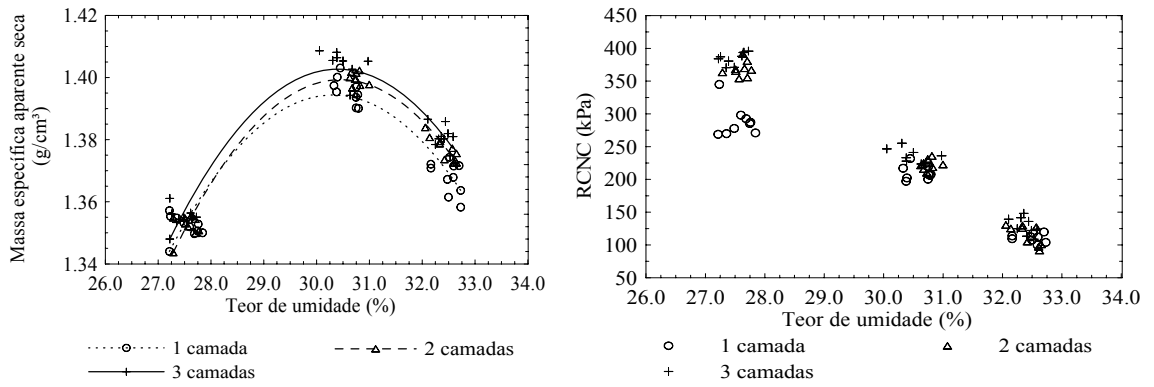
No teor ótimo de umidade a amostra compactada estaticamente (Figura 15a) apresentou estrutura grânica compactada ponteadada (*bridge structure*), com grãos fraturados e não-fraturados, com pseudomorfos em torno de 10% e plasma difuso envolvente (37%), com porosidade mais ou menos conectada, microporosidade abundante e macroporos de cerca de 15%. Apresenta ainda, como mostra a Figura 17a, grandes vazios pouco conectados, algo alinhados, que parecem representar um efeito lubrificante de água excessiva que provocou descolamento e fraturamento paralelos à parede do cilindro. Por outro lado a amostra compactada dinamicamente (Figura 15b) apresentou aproximadamente 6% de pseudomorfos e plasma claro envolvente (25%) com porosidade (17%) formada de poros de empacotamento simples.

A amostra compactada estaticamente, Figura 16a, no teor de umidade hot - 3%, apresentou estrutura parecida com aquela da amostra compactada utilizando o método dinâmico de compactação na umidade ótima, com 10% de pseudomorfos, 26% de plasma envolvente e porosidade de 22%. Por outro lado a amostra compactada dinamicamente, representada pela Figura 16b, apresenta estrutura grânica ponteadada com grãos predominantemente fraturados, 8% de pseudomorfos e 30% de plasma difuso envolvente ocupando o espaço poroso, bem como apresenta 18% de porosidade difusa, com poros e vazios pouco conectados.

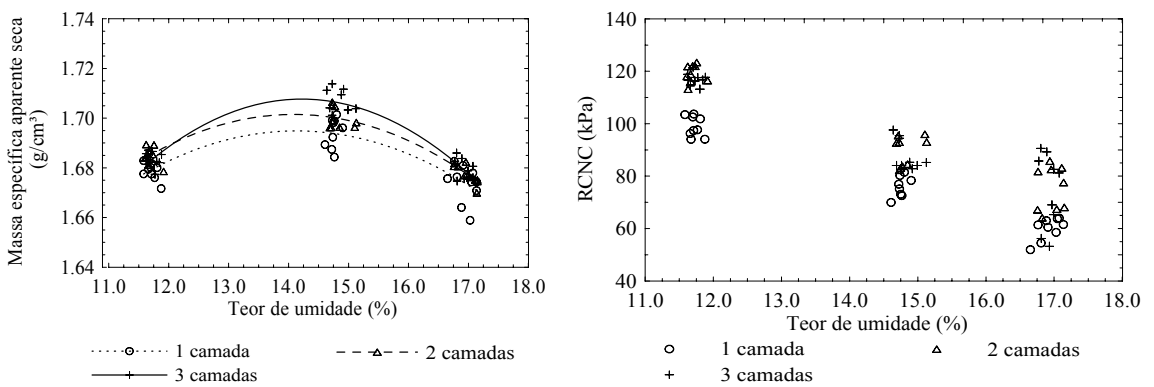
Finalizando, vale destacar que o que foi dito no item 4.3 é confirmado pela análise micromofológica, ou seja, quanto ao Solo 1, nota-se que a compactação dinâmica resultou em quebra da estrutura original do mesmo resultando em perda de resistência mecânica; quanto ao Solo 2, ocorre menor porosidade para a compactação dinâmica, evidenciando um melhor arranjo de partículas.

4.4. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE CAMADAS DE SOLO NA COMPACTAÇÃO

O estudo da influência do número de camadas dos corpos-de-prova nas curvas de compactação e na resistência mecânica dos solos 1 e 2 se encontra apresentado na Figura 18, empregando-se as modalidades de compactação estática.



(a) Solo 1



(b) Solo 2

Figura 18. Curvas de compactação e resistências à compressão não confinada para os solos 1 e 2.

As Tabelas 13 e 14 mostram os parâmetros estatísticos básicos obtidos para γ_s e RCNC, respectivamente para os solos 1 e 2.

Tabela 13. Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

Parâmetros avaliados	Estatísticas		h _{ot} - 3%	h _{ot}	h _{ot} + 2%
			1 camada		
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,35	1,40	1,37
	s	g/cm ³	2,55E-03	4,28E-03	5,33E-03
	CV	%	0,19	0,31	0,39
RCNC	\bar{x}	kPa	288,39	209,93	110,75
	s	kPa	23,64	10,92	6,35
	CV	%	8,20	5,20	5,73
2 camadas					
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,35	1,40	1,38
	s	g/cm ³	2,09E-03	1,98E-03	3,84E-03
	CV	%	0,15	0,14	0,28
RCNC	\bar{x}	kPa	368,38	223,19	114,90
	s	kPa	11,68	7,92	15,74
	CV	%	3,17	3,55	13,70
3 camadas					
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,36	1,40	1,38
	s	g/cm ³	2,22E-03	5,53E-03	3,56E-03
	CV	%	0,16	0,39	0,26
RCNC	\bar{x}	kPa	384,95	234,19	128,69
	s	kPa	9,41	11,71	13,35
	CV	%	2,44	5,00	10,37

Tabela 14. Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

Parâmetros avaliados	Estatísticas		h _{ot} - 3%	h _{ot}	h _{ot} + 2%
			1 camada		
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,68	1,69	1,67
	s	g/cm ³	3,68E-03	5,99E-03	7,71E-03
	CV	%	0,22	0,35	0,46
RCNC	\bar{x}	kPa	99,00	75,60	59,91
	s	kPa	3,93	3,91	4,20
	CV	%	3,97	5,17	7,01
2camadas					
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,69	1,70	1,68
	s	g/cm ³	3,54E-03	4,30E-03	4,04E-03
	CV	%	0,21	0,25	0,24
RCNC	\bar{x}	kPa	119,12	89,34	75,30
	s	kPa	3,42	5,73	8,49
	CV	%	2,87	6,41	11,27
3 camadas					
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,68	1,71	1,68
	s	g/cm ³	3,04E-03	5,23E-03	4,13E-03
	CV	%	0,18	0,31	0,25
RCNC	\bar{x}	kPa	116,96	88,12	74,81
	s	kPa	2,40	5,89	14,21
	CV	%	2,05	6,68	18,99

Analisando os dados apresentados na Figura 18 e nas Tabelas 13 e 14, nota-se que a dispersão dos resultados obtidos é pequena. Os valores dos coeficientes de variação (CV) chegam ao máximo de 0,46%, para o parâmetro γ_s (Solo 2), indicando pouca variação dos resultados em torno da média. Quanto aos valores de CV encontrados para o parâmetro RCNC, pode-se afirmar que também são pequenos, não ultrapassando 10%, exceto para o Solo 2 no teor de umidade h_{ot} + 2%, onde CV chega a 19% para a compactação em três camadas.

Na Figura 19, apresentam-se as diferenças relativas entre os valores médios de γ_s e RCNC obtidos com as modalidades de compactação analisadas. Nota-se, na Figura 19a, que as diferenças médias referentes ao parâmetro γ_s são muito pequenas,

não chegando a 1%, sendo maiores entre as compactações em uma e em três camadas (tomado como referência). Quanto ao parâmetro RCNC, as diferenças relativas entre as resistências médias são expressivas, chegando a 25%, sendo, também, maiores as diferenças entre as compactações em uma e em três camadas. As compactações em duas e em três camadas apresentaram resultados muito próximos, tanto para γ_s quanto para RCNC.

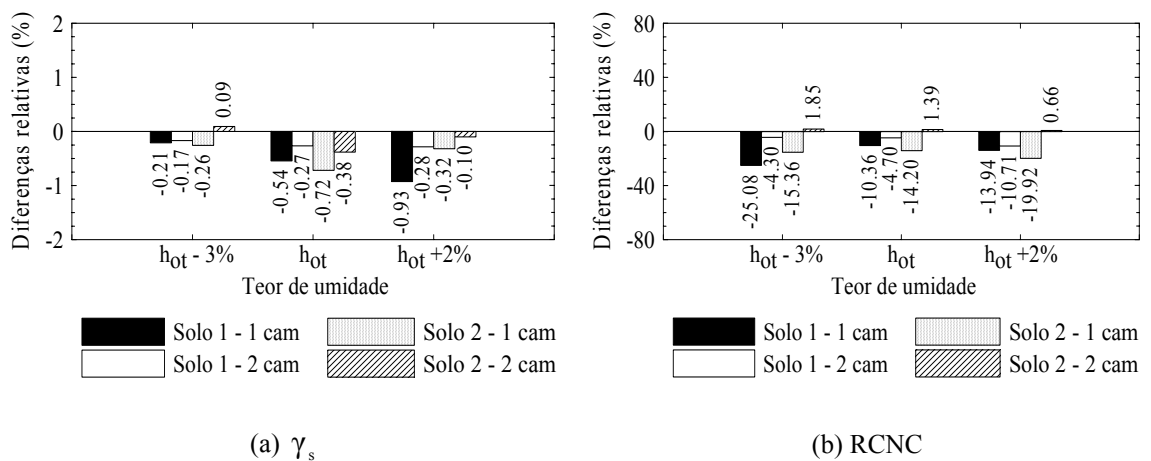


Figura 19. Diferenças relativas entre médias obtidas para os parâmetros γ_s e RCNC dos solos 1 e 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas.

As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados da análise de variância dos parâmetros γ_s e RCNC, para os solos 1 e 2. Considerando ambos os parâmetros, observa-se que existem diferenças estatisticamente significativas, a 5% de probabilidade, entre as compactações realizadas em uma e em três camadas, exceto para γ_s do Solo 2 no teor de umidade $h_{ot} + 2\%$, porém, as diferenças entre as compactações em duas e três camadas não são estatisticamente significativas, exceto para γ_s do Solo 2, na umidade ótima.

Tabela 15. Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para os parâmetros γ_s e RCNC do Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

Contrastes avaliados	$h_{ot} - 3\%$	h_{ot}	$h_{ot} + 2\%$
γ_s			
1 cam x 3 cam	*	**	**
2 cam x 3 cam	ns	ns	ns
1 cam x 2 cam	ns	ns	**
RCNC			
1 cam x 3 cam	**	**	*
2 cam x 3 cam	ns	ns	ns
1 cam x 2 cam	*	*	ns

(*) e (**) indicam a ocorrência de diferenças significativas respectivamente a 5% e 1% e (ns) indica que não existem diferenças estatisticamente significativas a 5% de probabilidade.

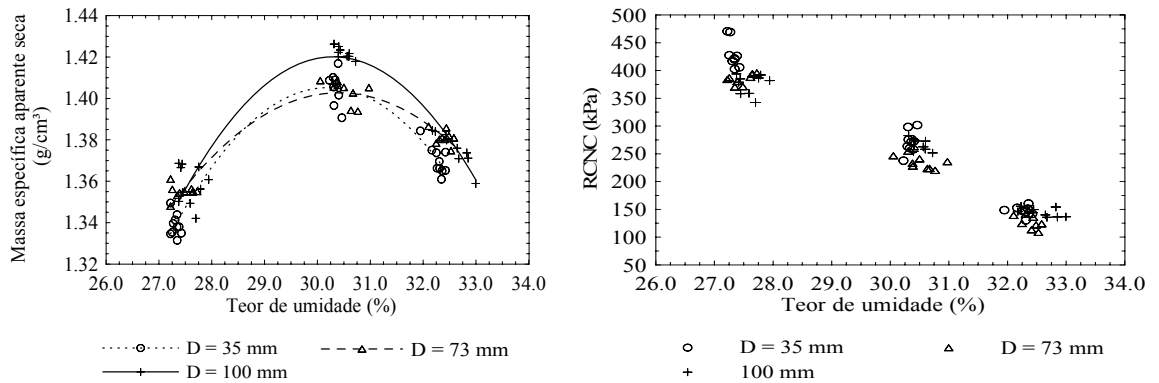
Tabela 16. Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para os parâmetros γ_s e RCNC do Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

Contrastes avaliados	$h_{ot} - 3\%$	h_{ot}	$h_{ot} + 2\%$
γ_s			
1 cam x 3 cam	*	**	ns
2 cam x 3 cam	ns	*	ns
1 cam x 2 cam	**	ns	ns
RCNC			
1 cam x 3 cam	**	**	*
2 cam x 3 cam	ns	ns	ns
1 cam x 2 cam	**	**	**

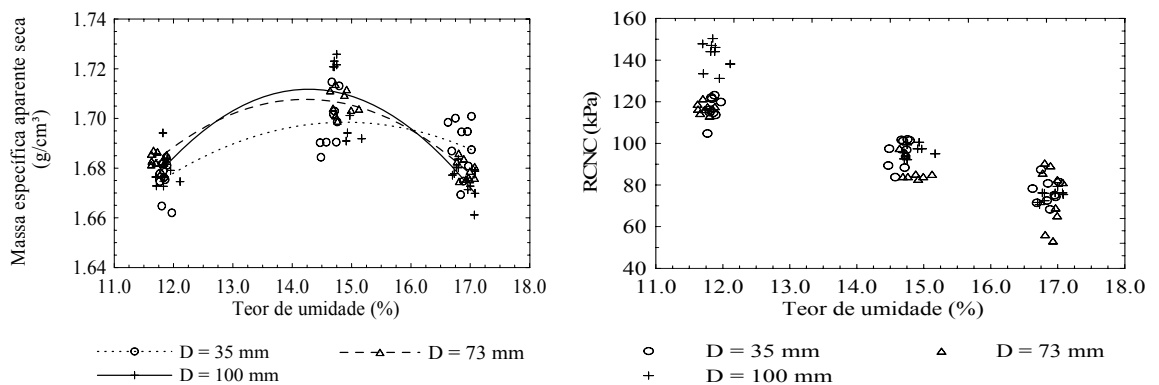
(*) e (**) indicam a ocorrência de diferenças significativas respectivamente a 5% e 1% e (ns) indica que não existem diferenças estatisticamente significativas a 5% de probabilidade.

4.5. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO CILINDRO DE COMPACTAÇÃO

Os resultados do presente estudo, considerando-se corpos-de-prova compactados estaticamente com diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm encontram-se apresentados na Figura 20.



(a) Solo 1



(b) Solo 2

Figura 20. Curvas de compactação e resistências à compressão não confinada para os solos 1 e 2.

As Tabelas 17 e 18 mostram os parâmetros estatísticos básicos dos resultados obtidos para γ_s e RCNC, respectivamente para corpos-de-prova dos solos 1 e 2 compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.

Tabela 17. Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35mm, 73 mm e 100 mm

Parâmetros avaliados	Estatísticas	$h_{ot} - 3\%$	h_{ot}	$h_{ot} + 2\%$
		D = 35 mm		
γ_s	\bar{x} g/cm ³	1,34	1,41	1,37
	s g/cm ³	5,34E-03	7,83E-03	7,01E-03
	CV %	0,40	0,56	0,51
RCNC	\bar{x} kPa	429,03	271,06	147,28
	s kPa	24,67	19,93	8,31
	CV %	5,75	7,35	5,64
D = 73 mm				
γ_s	\bar{x} g/cm ³	1,36	1,40	1,38
	s g/cm ³	2,22E-03	5,53E-03	3,56E-03
	CV %	0,16	0,39	0,26
RCNC	\bar{x} kPa	384,95	234,19	128,69
	s kPa	9,41	11,71	13,35
	CV %	2,44	5,00	10,37
D = 100 mm				
γ_s	\bar{x} g/cm ³	1,36	1,42	1,38
	s g/cm ³	9,42E-03	2,62E-03	8,24E-03
	CV %	0,69	0,18	0,60
RCNC	\bar{x} kPa	375,30	265,41	144,23
	s kPa	17,82	10,90	7,66
	CV %	4,75	4,11	5,31

Tabela 18. Indicadores estatísticos básicos para os resultados de γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35mm, 73 mm e 100 mm

Parâmetros avaliados	Estatísticas		h _{ot} - 3%	h _{ot}	h _{ot} + 2%
			D = 35 mm		
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,68	1,70	1,69
	s	g/cm ³	7,60E-03	10,61E-03	11,61E-03
	CV	%	0,45	0,62	0,69
RCNC	\bar{x}	kPa	116,76	95,79	76,63
	s	kPa	5,72	6,86	5,90
	CV	%	4,90	7,16	7,70
D = 73 mm					
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,68	1,71	1,68
	s	g/cm ³	3,04E-03	5,23E-03	4,13E-03
	CV	%	0,18	0,31	0,25
RCNC	\bar{x}	kPa	116,96	88,12	74,81
	s	kPa	2,40	5,89	14,21
	CV	%	2,05	6,68	18,99
D = 100 mm					
γ_s	\bar{x}	g/cm ³	1,68	1,71	1,68
	s	g/cm ³	7,05E-03	15,05E-03	6,70E-03
	CV	%	0,42	0,88	0,40
RCNC	\bar{x}	kPa	142,46	96,16	74,90
	s	kPa	6,67	2,81	2,76
	CV	%	4,69	2,92	3,69

Analisando os dados apresentados na Figura 20 e nas Tabelas 17 e 18, infere-se que os valores de desvio padrão (s) obtidos para γ_s são pequenos em relação às respectivas médias, uma vez que o coeficiente de variação (CV) é inferior a 1%. Quanto aos desvios relativos RCNC, estes são maiores, porém inferiores a 10%, exceto para corpos-de-prova do Solo 2 compactados no teor de umidade h_{ot} + 2%, para o diâmetro de 73 mm.

Na Figura 21, são mostradas as diferenças relativas entre os valores médios de γ_s e RCNC obtidos no presente estudo, tomando como referência os resultados de corpos-de-prova moldados no diâmetro de 100 mm. Observa-se que as diferenças entre γ_s são pequenas, chegando ao máximo de 1,5%, conforme se ilustra na Figura 21a,

sendo maiores para o Solo 1 e entre corpos-de-prova com diâmetros de 35 mm e 100 mm, exceto na umidade ótima, onde o Solo 1 apresenta maior diferença entre 73 mm e 100 mm. Quanto ao parâmetro RCNC, notou-se a ocorrência de diferenças expressivas em alguns casos, chegando a 18%, como se visualiza na Figura 21b para o Solo 2. Notadamente, as diferenças relativas são maiores para o teor de umidade $h_{ot} - 3\%$.

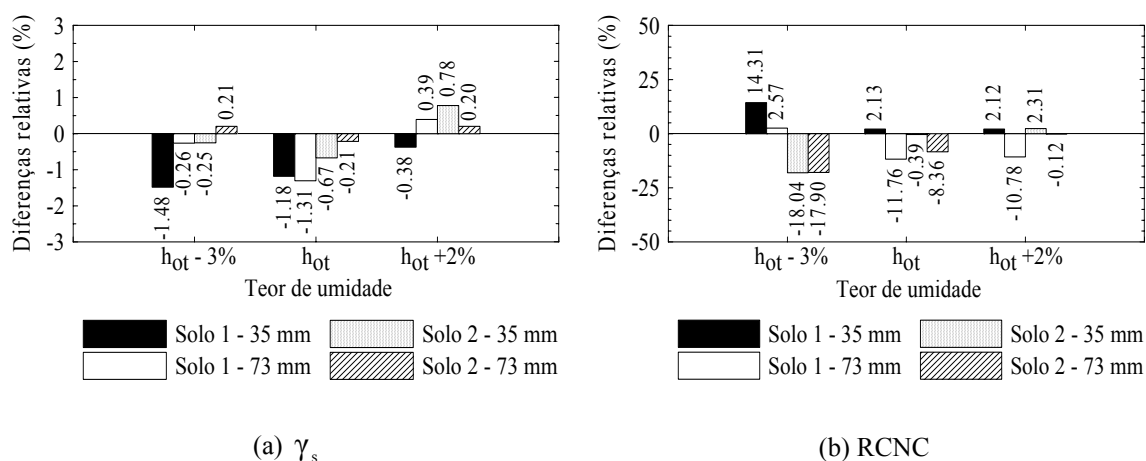


Figura 21. Diferenças relativas entre médias obtidas para os parâmetros γ_s e RCNC dos solos 1 e 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm.

As Tabelas 19 e 20 trazem os resultados da análise de variância dos parâmetros γ_s e RCNC, para os solos 1 e 2, levando em conta a influência do diâmetro do corpo-de-prova. Considerando o Solo 1, nota-se que existem diferenças estatisticamente significativas, a 5% de probabilidade, entre as compactações realizadas com os diâmetros de 35 mm e de 100 mm (referência), nos teores de umidade $h_{ot} - 3\%$ e h_{ot} , para γ_s , e no teor $h_{ot} - 3\%$, para RCNC; bem como ocorrem diferenças significativas entre as compactações nos diâmetros de 73 mm e de 100 mm, na umidade ótima, para γ_s , e nos teores h_{ot} e $h_{ot} + 2\%$, para RCNC. Quanto ao Solo 2, não existem diferenças estatisticamente significativas entre os parâmetros analisados relativos aos diâmetros de 35 mm e 100 mm e de 73 mm e 100 mm, exceto para γ_s no teor de umidade $h_{ot} + 2\%$, considerando-se os diâmetros 35 mm e 100 mm, e para RCNC no teor de umidade $h_{ot} - 3\%$, considerando-se os diâmetros 35 mm e 100 mm e 73 mm e 100 mm.

Tabela 19. Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para parâmetros γ_s e RCNC do Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

Parâmetros avaliados	$h_{ot} - 3\%$	h_{ot}	$h_{ot} + 2\%$
γ_s			
D = 35 mm x D = 100 mm	**	**	ns
D = 73 mm x D = 100 mm	ns	**	ns
D = 35 mm x D = 73 mm	**	ns	**
RCNC			
D = 35 mm x D = 100 mm	**	ns	ns
D = 73 mm x D = 100 mm	ns	**	**
D = 35 mm x D = 73 mm	**	**	**

(*) e (**) indicam a ocorrência de diferenças significativas respectivamente a 5% e 1% e (ns) indica que não existem diferenças estatisticamente significativas a 5% de probabilidade.

Tabela 20. Resultados da análise de variância aplicada aos resultados obtidos para os parâmetros γ_s e RCNC do Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

Parâmetros avaliados	$h_{ot} - 3\%$	h_{ot}	$h_{ot} + 2\%$
γ_s			
D = 35 mm x D = 100 mm	ns	ns	*
D = 73 mm x D = 100 mm	ns	ns	ns
D = 35 mm x D = 73 mm	*	ns	ns
RCNC			
D = 35 mm x D = 100 mm	**	ns	ns
D = 73 mm x D = 100 mm	**	ns	ns
D = 35 mm x D = 73 mm	ns	*	ns

(*) e (**) indicam a ocorrência de diferenças significativas respectivamente a 5% e 1% e (ns) indica que não existem diferenças estatisticamente significativas a 5% de probabilidade.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho gerou-se um banco de dados expressivo, para fins de análise da influência do modo de compactação (estático e dinâmico), número de camadas e diâmetros dos corpos-de-prova nos parâmetros de compactação, em especial no γ_s e na h_{ot} , e na estrutura de dois solos residuais da Zona da Mata Mineira. Conclusões do estudo são as que seguem:

- sistematicamente, observou-se que a compactação estática produziu corpos-de-prova que apresentaram maiores e menores RCNC, respectivamente, para os solos 1 e 2, o que traz à tona a importância dos processos de formação dos solos nas suas respostas mecânicas quando compactados;
- considerando-se os métodos de compactação estático e dinâmico, houve diferenças estatisticamente significativas nos parâmetros γ_s e RCNC para os dois solos em estudo, com exceção do Solo 1, para o teor de umidade $h_{ot} + 2\%$. Assim, não se recomenda o emprego da compactação estática em laboratório, para fins de obtenção de parâmetros de compactação e de resistência mecânica que venham a ser utilizados em projetos e controle de compactação no campo, devendo-se empregar a modalidade por impacto tradicional, aqui denominada dinâmica;
- a incorporação da análise micromorfológica ao presente trabalho forneceu subsídios de grande interesse para a análise dos mecanismos de estruturação dos solos nas compactações estática e dinâmica;

- quanto ao estudo da influência do número de camadas dos corpos-de-prova, observou-se, diferenças estatisticamente significativas tanto para o parâmetro γ_s quanto para RCNC, entre as compactações realizadas em uma camada e em três camadas, exceto para γ_s do Solo 2, em que se observou diferenças, também, entre a compactação em duas e três camadas, na umidade ótima. Pode-se afirmar que, para os solos estudados, a compactação em duas e três camadas levou aos mesmos resultados, não sendo recomendável a compactação em apenas uma camada;
- em termos dos parâmetros ótimos de compactação, para o Solo 1, a influência do diâmetro do corpo-de-prova resultou em diferenças estatisticamente significativas entre as compactações realizadas com os diâmetros de 35 mm e de 100 mm e 73 mm e 100 mm, para γ_s , e entre os diâmetros de 73 mm e de 100 mm para RCNC; com relação ao Solo 2, não se observou diferenças estatisticamente significativas entre os parâmetros analisados.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomendações para trabalhos futuros são, como se segue:

- aumentar o universo de solos, com a inclusão de uma unidade abundante no Complexo Cristalino Brasileiro, que é um solo residual jovem (saprolito) com fração silte significativa e que se enquadra nos Tipos II ou III do DNIT (DNIT, 2006), quanto à resiliência, bem como da unidade Argissolo Vermelho Amarelo com Horizonte B Bruno Micáceo, também comum na Microrregião de Viçosa e que apresenta elevado índice de vazios no estado natural, superior a 1,5 segundo Azevedo (1999). Destaca-se que esses solos já foram objeto de análise em estudos de estabilização de solos para fins rodoviários desenvolvidos no DEC/UFV;
- caracterizar geotécnica, química e mineralogicamente as unidades de solos em estudo;
- estudar a influência de métodos de compactação de laboratório e de campo na estrutura dos solos, com base em parâmetros de compactação e de resistência mecânica, considerando: (i) diferentes teores de umidade de compactação; (ii) ensaios de resistência mecânica (compressão não confinada e triaxial) e (iii) anisotropia e parâmetros de deformabilidade (módulos de elasticidade tangente inicial e secante);
- estudar, em escala micromorfológica, os solos após compactação no laboratório e no campo, para fins de avaliação da ocorrência de mudanças

microestruturais que venham consubstanciar os resultados obtidos nos ensaios de compactação e de resistência mecânica;

- desenvolver modelos estatísticos que representem as curvas de compactação, considerando-se as situações de compactação de laboratório e de campo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, RJ, 1984a, 6 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, RJ, 1984b, 8 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, RJ, 1984c, 3 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - análise granulométrica.** Rio de Janeiro, RJ, 1984d, 13 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, RJ, 1986, 10 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12004: Solo - determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos.** Rio de Janeiro, RJ, 1990, 6 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12051: Solo - determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos.** Rio de Janeiro, RJ, 1991, 14 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solos e rochas.** Rio de Janeiro, RJ, 1995, 18 p.

- AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa-MG**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa: Imprensa Universitária, 1999, 169 p. (Dissertação de Mestrado).
- BARDEN, L.; SIDES, G. R. Engineering behavior and structure of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, 96, No. SM4, p. 1171, 1970.
- BUENO, B. S.; LIMA, D. C.; MINETTE, E. **Geotechnical aspects of Viçosa soils**. In: Proceedings US/Brazil Geotechnical Workshop: Applicability of Classical Soil Mechanics Principles to Structured Soils. Editor: Dario Cardoso de Lima, Alberto S. Nieto, Cassio B. Viotti e Benedito de Souza Bueno. Belo Horizonte, Brazil, 23-25 November, p. 349- 354, 1992.
- CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos de mecânica dos solos**. 1ª ed. Campina Grande, Paraíba: Gráfica Marconi, 1997, 310 p.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 129/94: Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, RJ, 1994, 7 p.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR - Publicação 719. Rio de Janeiro, RJ, 2006, 274 p.
- FERNANDES FILHO, E. I.; VIANA, J. H. M. Quantiporo: um novo programa para tratamento e quantificação de imagens digitais para aplicações em ciência do solo. **In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 28, Londrina, 2001, resumos. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001, p. 224.
- FITZPATRICK, E. A. **Pedology: a systematic approach to soil science**. London, Oliver & Boyd, 1971, 306 p.
- FITZPATRICK, E. A. **Soil microscopy and micromorfology**. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1993, 304 p.
- GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 11ª ed. Piracicaba, SP: Nobel, 1985, 466 p.
- GUEDES DE MELO, F. **Compactação de aterros de barragens de terra**. Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 1985, 117 p.

- HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing – volume 1: soil classification and compaction tests**. 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1984, vol. 1, 339 p.
- HILF, J. W. Compacted fill. In: FANG, H. (Ed.). **Foundation engineering handbook**. 2nd ed. New York, NY, USA: Chapman & Hall, 1992, 909 p., cap. 8.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York, USA: John Wiley, 1979, 582 p.
- LANGFELDER, L. J.; CHEN, C. F.; JUSTICE, J. A. Air permeability of compacted cohesive soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE 94, No. SM4, July, p. 999, 1968.
- MALTONI, K. L. Estudo de compactação e/ou adensamento em subsuperfície de latossolos sob diferentes usos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa: Imprensa Universitária, 1994, 139 p. (Tese de Doutorado).
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, NY, USA: John Wiley, 1976, 422 p.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução: Verônica Calado. 2^a ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2003, 463 p.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica de solos**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2000, 247 p.
- RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4^a ed. Viçosa, MG: NEPUT, 2002, 338 p.
- RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres**. México: Editorial Limusa, 1976, vol. 1, 459 p.
- SCHAEFER, C. E. R. Brazilian latosols and their B horizon microstructure as long-term biotic constructs. **Australian Journal of Soil Research**, 39:909-926, 2001.
- STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H.; DICKEY, D. A. **Principles and procedures of statistics a biometrical approach**. 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Companies, 1997, 666 p.
- TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em estradas e em obras geotécnicas**

de caráter ambiental. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa: Imprensa Universitária, 2006, 254 p. (Tese de Doutorado).

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimentos e secagem na reorganização da estrutura microgranular de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:1-9, 2004.

ANEXO

A.1. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO NA ESTRUTURA DOS SOLOS

Tabela A.1 Resultados de h , γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica

	CP	Modalidade estática			Modalidade dinâmica		
		h	γ_s	RCNC	h	γ_s	RCNC
		%	g/cm ³	kPa	%	g/cm ³	kPa
$h_{ot} - 3\%$	1	27,79	1,36	391,93	27,74	1,34	301,06
	2	27,38	1,37	393,95	28,08	1,35	265,75
	3	27,94	1,36	381,89	27,77	1,35	273,16
	4	27,75	1,37	386,40	27,94	1,34	267,88
	5	27,41	1,37	378,98	27,69	1,35	276,61
	6	27,44	1,37	384,95	27,53	1,36	288,06
	7	27,45	1,35	358,30	27,51	1,36	273,69
	8	27,59	1,35	359,00	27,37	1,35	270,42
	9	27,70	1,34	342,33	27,44	1,35	254,19
h_{ot}	1	30,31	1,43	282,64	30,46	1,42	261,69
	2	30,41	1,43	275,39	30,43	1,41	233,92
	3	30,43	1,42	273,41	30,48	1,41	231,99
	4	30,60	1,42	272,93	30,39	1,42	222,97
	5	30,56	1,42	262,51	30,43	1,42	237,98
	6	30,72	1,42	251,62	30,54	1,41	231,19
	7	30,60	1,42	258,34	30,51	1,42	225,07
	8	30,40	1,42	254,39	30,42	1,42	227,63
	9	30,40	1,42	257,45	30,70	1,42	218,96
$h_{ot} + 2\%$	1	32,18	1,38	145,98	32,29	1,39	143,56
	2	32,23	1,38	155,62	32,41	1,39	141,63
	3	32,43	1,38	143,88	32,26	1,39	139,23
	4	32,45	1,38	149,65	32,34	1,39	142,26
	5	33,00	1,36	136,63	32,25	1,39	150,49
	6	32,67	1,37	135,78	32,92	1,38	131,60
	7	32,85	1,37	136,35	32,83	1,37	130,64
	8	32,83	1,37	154,15	32,68	1,38	139,67
	9	32,65	1,38	140,02	33,15	1,37	138,49

Tabela A.2 Resultados de h , γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica

	CP	Modalidade estática			Modalidade dinâmica		
		h	γ_s	RCNC	w	γ_s	RCNC
		%	g/cm ³	kPa	%	kN/m ³	kPa
$h_{ot} - 3\%$	1	11,71	1,67	133,45	11,75	1,71	152,24
	2	11,70	1,69	147,80	11,73	1,71	153,94
	3	11,85	1,68	150,35	11,77	1,71	151,67
	4	11,83	1,67	147,02	11,70	1,70	145,46
	5	11,95	1,68	131,19	11,70	1,71	153,91
	6	11,88	1,68	144,04	11,91	1,70	145,24
	7	11,82	1,69	144,04	11,83	1,72	150,81
	8	12,11	1,67	138,16	11,79	1,70	151,50
	9	11,89	1,68	146,09	12,01	1,70	148,36
h_{ot}	1	14,97	1,70	97,38	15,14	1,72	114,25
	2	15,17	1,69	95,03	15,03	1,73	118,48
	3	14,93	1,69	100,55	15,01	1,73	127,61
	4	14,91	1,69	97,38	15,11	1,73	122,37
	5	14,71	1,72	95,49	15,13	1,74	117,99
	6	14,71	1,72	92,54	14,77	1,76	121,70
	7	14,69	1,72	95,59	14,85	1,76	117,99
	8	14,75	1,73	92,18	14,84	1,75	124,26
	9	14,75	1,72	99,30	14,74	1,76	118,48
$h_{ot} + 2\%$	1	17,07	1,66	76,20	17,16	1,72	84,22
	2	16,96	1,67	76,20	17,06	1,72	84,22
	3	17,08	1,68	75,42	16,99	1,72	89,60
	4	17,00	1,67	79,31	16,84	1,73	89,10
	5	16,77	1,68	76,20	17,08	1,72	84,88
	6	16,70	1,68	71,65	16,79	1,74	89,03
	7	16,80	1,68	72,46	16,85	1,74	88,84
	8	16,73	1,68	70,61	16,83	1,73	86,80
	9	16,80	1,68	76,04	16,75	1,74	92,88

Tabela A.3 Teste t aplicado aos resultados obtidos para o Solo 1, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica

	Médias		t_{cal}	t_{tab}	
	gl	Compactação estática			Compactação dinâmica
	γ_s				
$h_{ot} - 3\%$	16	1,36	1,35	<u>2,44</u>	2,12
h_{ot}	16	1,42	1,42	<u>2,76</u>	
$h_{ot} + 2\%$	16	1,38	1,38	-1,68	
	RCNC				
$h_{ot} - 3\%$	16	375,30	274,54	<u>13,54</u>	2,12
h_{ot}	16	265,41	232,38	<u>5,99</u>	
$h_{ot} + 2\%$	16	144,23	139,73	1,38	

Tabela A.4. Teste t aplicado aos resultados obtidos para o Solo 2, empregando-se as modalidades de compactação estática e dinâmica

	Médias		t_{cal}	t_{tab}	
	gl	Compactação estática			Compactação dinâmica
	γ_s				
$h_{ot} - 3\%$	16	1,68	1,71	<u>-7,83</u>	2,12
h_{ot}	16	1,71	1,74	<u>-4,95</u>	
$h_{ot} + 2\%$	16	1,68	1,73	<u>-16,39</u>	
	RCNC				
$h_{ot} - 3\%$	16	142,46	150,35	<u>-3,18</u>	2,12
h_{ot}	16	96,16	120,35	<u>-14,80</u>	
$h_{ot} + 2\%$	16	74,90	87,73	<u>-9,57</u>	

A.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE CAMADAS DO CORPO-DE-PROVA

Tabela A.5 Resultados de h , γ_s e RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

CP	1 camada			2 camadas			3 camadas			
	h	γ_s	RCNC	h	γ_s	RCNC	h	γ_s	RCNC	
	%	g/cm^3	kPa	%	g/cm^3	kPa	%	g/cm^3	kPa	
$h_{ot} - 3\%$	1	27,84	1,35	270,93	27,71	1,35	355,72	27,22	1,36	384,10
	2	27,75	1,35	285,35	27,77	1,35	367,09	27,35	1,35	370,48
	3	27,76	1,35	287,09	27,57	1,35	354,07	27,25	1,36	387,02
	4	27,69	1,35	292,62	27,29	1,35	363,45	27,39	1,35	380,55
	5	27,48	1,35	277,84	27,63	1,36	391,50	27,61	1,36	387,92
	6	27,21	1,36	268,82	27,70	1,35	380,79	27,64	1,35	393,45
	7	27,60	1,35	298,05	27,51	1,35	367,89	27,72	1,36	395,77
	8	27,35	1,35	269,81	27,51	1,35	365,25	27,49	1,35	371,09
	9	27,23	1,36	344,98	27,66	1,36	369,66	27,65	1,36	394,14
h_{ot}	1	30,75	1,39	219,18	30,81	1,40	235,80	30,97	1,41	236,02
	2	30,79	1,39	207,75	30,82	1,40	218,85	30,67	1,40	223,76
	3	30,75	1,39	200,23	30,74	1,40	231,26	30,77	1,39	220,27
	4	30,75	1,40	207,72	30,75	1,40	229,08	30,63	1,39	223,63
	5	30,78	1,39	206,12	31,00	1,40	222,79	30,50	1,41	241,05
	6	30,33	1,40	217,07	30,66	1,40	223,34	30,31	1,41	255,15
	7	30,38	1,40	197,17	30,63	1,40	221,39	30,39	1,41	228,08
	8	30,39	1,40	202,29	30,67	1,40	216,02	30,05	1,41	246,60
	9	30,45	1,40	231,80	30,73	1,40	210,19	30,38	1,41	233,19
$h_{ot} + 2\%$	1	32,73	1,36	103,90	32,65	1,38	100,97	32,49	1,38	122,13
	2	32,50	1,36	107,50	32,62	1,37	91,65	32,41	1,38	113,34
	3	32,70	1,37	119,82	32,61	1,37	97,46	32,58	1,38	124,01
	4	32,48	1,37	112,37	32,42	1,37	105,22	32,53	1,37	108,82
	5	32,59	1,37	99,91	32,57	1,38	127,17	32,44	1,39	135,97
	6	32,16	1,37	109,52	32,33	1,38	126,00	32,25	1,38	124,77
	7	32,16	1,37	113,85	32,34	1,38	129,64	32,10	1,39	139,35
	8	32,59	1,37	112,07	32,14	1,38	125,25	32,31	1,38	141,51
	9	32,51	1,37	117,78	32,06	1,38	130,73	32,36	1,38	148,27

Tabela A.6 Resultados de h , γ_s e RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

CP	1 camada			2 camadas			3 camadas			
	h	γ_s	RCNC	h	γ_s	RCNC	h	γ_s	RCNC	
	%	g/cm ³	kPa	%	g/cm ³	kPa	%	g/cm ³	kPa	
$h_{ot} - 3\%$	1	11,88	1,67	94,07	11,73	1,69	121,96	11,70	1,68	121,44
	2	11,81	1,68	101,85	11,70	1,69	122,04	11,62	1,69	118,85
	3	11,71	1,68	97,42	11,63	1,68	113,21	11,63	1,68	116,49
	4	11,77	1,68	97,68	11,91	1,68	116,49	11,66	1,69	114,43
	5	11,71	1,68	103,69	11,76	1,69	123,36	11,73	1,69	116,28
	6	11,70	1,68	102,57	11,67	1,69	118,94	11,80	1,68	113,19
	7	11,66	1,68	96,27	11,67	1,68	116,18	11,84	1,68	116,71
	8	11,58	1,68	103,46	11,63	1,69	121,84	11,77	1,68	117,59
	9	11,67	1,68	94,03	11,61	1,68	118,09	11,88	1,69	117,70
h_{ot}	1	14,90	1,70	78,36	15,10	1,70	96,02	14,69	1,70	84,08
	2	14,80	1,70	81,49	14,71	1,70	95,50	14,76	1,70	84,08
	3	14,76	1,70	72,59	15,13	1,70	93,03	14,73	1,70	94,46
	4	14,72	1,69	76,93	14,69	1,70	92,68	14,64	1,71	97,60
	5	14,73	1,70	75,14	14,75	1,70	83,14	14,99	1,70	84,08
	6	14,76	1,68	72,59	14,73	1,71	82,27	15,12	1,70	85,21
	7	14,74	1,69	80,26	14,73	1,71	93,03	14,92	1,71	82,82
	8	14,61	1,69	69,96	14,85	1,70	84,60	14,88	1,71	85,29
	9	14,75	1,70	73,09	14,78	1,70	83,79	14,73	1,71	95,44
$h_{ot} + 2\%$	1	17,07	1,68	63,97	17,14	1,67	77,57	16,81	1,69	90,60
	2	17,03	1,66	58,54	16,94	1,68	85,78	16,78	1,68	85,77
	3	17,05	1,67	63,76	16,96	1,68	82,56	17,07	1,68	81,21
	4	16,89	1,66	63,03	16,77	1,68	81,79	17,00	1,68	82,59
	5	16,65	1,68	51,94	17,11	1,68	83,16	16,89	1,68	89,27
	6	16,76	1,68	61,40	17,04	1,68	67,42	16,97	1,68	69,05
	7	16,91	1,68	60,48	17,15	1,68	68,08	16,99	1,68	65,31
	8	17,14	1,67	61,55	16,83	1,68	64,14	16,93	1,68	53,22
	9	16,81	1,68	54,50	16,76	1,68	67,19	16,81	1,67	56,23

Tabela A.7. Análise de variância aplicada aos resultados de γ_s obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

FV	gl	h _{ot} - 3%			h _{ot}			h _{ot} + 2%		
		SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal
Tratamentos*	2	4,09E-05	2,05E-05	<u>3,88</u>	2,62E-04	1,31E-04	<u>7,43</u>	7,72E-04	3,86E-04	<u>20,74</u>
Resíduo	24	1,27E-04	5,28E-06		4,22E-04	1,76E-05		4,47E-04	1,86E-05	
Total	26	1,68E-04			6,84E-04			1,22E-03		

* 3 tratamentos: compactação de em uma, duas e três camadas
F_{tab} = 3,40283

Tabela A.8. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de γ_s obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

	α	5%		1%		α	5%		1%	
		Δ	2,70E-03	3,48E-03	Δ		4,94E-03	6,35E-03	Δ	5,08E-03

		h _{ot} - 3%			h _{ot}			h _{ot} + 2%		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Médias		1,36	1,35	1,35	1,40	1,40	1,40	1,38	1,37	1,38
3 camadas	1	<u>2,84E-03</u>	2,30E-03		<u>7,62E-03</u>	3,72E-03		<u>1,28E-02</u>	3,89E-03	
1 camada	2	<u>2,84E-03</u>	5,44E-04	<u>7,62E-03</u>		3,90E-03	<u>1,28E-02</u>		<u>8,89E-03</u>	
2 camadas	3	2,30E-03	5,44E-04		3,72E-03	3,90E-03		3,89E-03	<u>8,89E-03</u>	

Tabela A.9. Análise de variância aplicada aos resultados de RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

FV	gl	h _{ot} - 3%			h _{ot}			h _{ot} + 2%		
		SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal
Tratamentos*	2	47990,49	23995,24	<u>91,87</u>	2658,08	1329,04	<u>12,50</u>	1587,35	793,68	<u>5,11</u>
Resíduo	24	6268,61	261,19		2551,90	106,33		3728,48	155,35	
Total	26	54259,10			5209,98			5315,83		

* 3 tratamentos: compactação em uma, duas e três camadas
F_{tab} = 3,40283

Tabela A.10. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

		α	5%	1%	α	5%	1%	α	5%	1%
		Δ	19,02	24,46	Δ	12,13	15,60	Δ	14,67	18,86
		$h_{ot} - 3\%$			h_{ot}			$h_{ot} + 2\%$		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Médias		384,95	288,39	368,38	234,19	209,93	223,19	128,69	110,75	114,90
3 camadas	1		<u>96,56</u>	16,57		<u>24,27</u>	11,00		<u>17,94</u>	13,79
1 camada	2	<u>96,56</u>		<u>79,99</u>	<u>24,27</u>		<u>13,27</u>	<u>17,94</u>		4,15
2 camadas	3	16,57	<u>79,99</u>		11,00	<u>13,27</u>		13,79	4,15	

Tabela A.11. Análise de variância aplicada aos resultados de γ_s obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

		$h_{ot} - 3\%$			h_{ot}			$h_{ot} + 2\%$		
FV	gl	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal
Tratamentos*	2	1,66E-04	8,32E-05	<u>7,07</u>	6,78E-04	3,39E-04	<u>12,43</u>	1,37E-04	6,84E-05	2,21
Resíduo	24	2,83E-04	1,18E-05		6,54E-04	2,73E-05		7,42E-04	3,09E-05	
Total	26	4,49E-04			1,33E-03			8,79E-04		

* 3 tratamentos: compactação em uma, duas e três camadas
 $F_{tab} = 3,40283$

Tabela A.12. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de γ_s obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

		α	5%	1%	α	5%	1%
		Δ	4,04E-03	5,19E-03	Δ	6,14E-03	7,90E-03
		$h_{ot} - 3\%$			h_{ot}		
		1	2	3	1	2	3
Médias		1,68	1,68	1,69	1,71	1,69	1,70
3 camadas	1		<u>4,33E-03</u>	1,53E-03		<u>1,23E-02</u>	<u>6,50E-03</u>
1 camada	2	<u>4,33E-03</u>		<u>5,86E-03</u>	<u>1,23E-02</u>		5,77E-03
2 camadas	3	1,53E-03	<u>5,86E-03</u>		<u>6,50E-03</u>	5,77E-03	

Tabela A.13. Análise de variância aplicada aos resultados de RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

FV	gl	h _{ot} - 3%			h _{ot}			h _{ot} + 2%		
		SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal
Tratamentos*	2	2195,98	1097,99	<u>100,22</u>	1040,75	520,38	<u>18,86</u>	1377,22	688,61	<u>7,09</u>
Residuo	24	262,95	10,96		662,07	27,59		2331,87	97,16	
Total	26	2458,92			1702,82			3709,09		

* 3 tratamentos: compactação em uma, duas e três camadas

F_{tab} = 3,40283

Tabela A.14. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados em uma, duas e três camadas

	α	5%	1%	α	5%	1%	α	5%	1%
Δ		3,89	5,01	Δ	6,18	7,95	Δ	11,60	14,92

		h _{ot} - 3%			h _{ot}			h _{ot} + 2%		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Médias		116,96	99,00	119,12	88,12	75,60	89,34	74,81	59,91	75,30
3 camadas	1		<u>17,96</u>	2,16		<u>12,52</u>	1,22		<u>14,90</u>	0,49
1 camada	2	<u>17,96</u>		<u>20,12</u>	<u>12,52</u>		<u>13,74</u>	<u>14,90</u>		<u>15,39</u>
2 camadas	3	2,16	<u>20,12</u>		1,22	<u>13,74</u>		0,49	<u>15,39</u>	

A.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO CILINDRO

Tabela A.15 Resultados de h , γ_s e RCNC obtidos para os solos 1 e 2, empregando-se corpos-de-prova compactados no diâmetro de 35 mm*

CP	Solo 1			Solo 2			
	h	γ_s	RCNC	h	γ_s	RCNC	
	%	g/cm ³	kPa	%	g/cm ³	kPa	
$h_{ot} - 3\%$	1	27,43	13,09	405,82	11,97	1,66	119,87
	2	27,34	13,18	421,72	11,86	1,68	114,71
	3	27,38	13,12	426,30	11,84	1,68	121,45
	4	27,31	13,15	417,18	11,80	1,66	116,15
	5	27,34	13,12	420,09	11,89	1,68	113,69
	6	27,35	13,06	402,66	11,80	1,68	115,00
	7	27,25	13,10	427,53	11,88	1,68	123,15
	8	27,22	13,23	470,63	11,83	1,68	122,09
	9	27,27	13,14	469,31	11,77	1,68	104,77
h_{ot}	1	30,34	13,82	260,18	14,48	1,68	97,45
	2	30,40	13,74	272,63	14,57	1,69	83,81
	3	30,23	13,82	237,65	14,47	1,69	89,37
	4	30,46	13,64	301,79	14,74	1,69	96,88
	5	30,36	13,80	271,47	14,67	1,71	101,70
	6	30,29	13,83	263,66	14,79	1,71	101,46
	7	30,31	13,70	275,67	14,76	1,70	101,89
	8	30,30	13,78	298,45	14,69	1,70	101,13
	9	30,39	13,89	258,00	14,71	1,70	88,40
$h_{ot} + 2\%$	1	32,35	13,35	151,23	16,97	1,68	74,34
	2	32,36	13,39	160,51	17,02	1,70	81,38
	3	32,26	13,40	147,90	16,95	1,69	75,18
	4	32,31	13,40	130,13	16,88	1,67	68,30
	5	32,17	13,48	152,82	16,69	1,69	71,44
	6	32,42	13,47	141,79	16,75	1,70	87,38
	7	32,25	13,47	147,29	16,85	1,69	80,79
	8	32,31	13,43	145,24	16,62	1,70	78,30
	9	31,95	13,58	148,63	16,84	1,67	72,57

* os resultados obtidos para a compactação de corpos-de-prova nos diâmetros de 73mm e 100 mm, constam respectivamente das A.5 e A.6 (3 camadas) e Tabelas A.1 e A.2 (modalidade estática).

Tabela A.16. Análise de variância aplicada aos resultados de γ_s obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

FV	gl	$h_{ot} - 3\%$			h_{ot}			$h_{ot} + 2\%$		
		SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal
Tratamentos*	2	2,08E-03	1,04E-03	<u>25,59</u>	1,89E-03	9,46E-04	<u>28,76</u>	5,01E-04	2,51E-04	<u>5,79</u>
Resíduo	24	9,77E-04	4,07E-05		7,90E-04	3,29E-05		1,04E-03	4,33E-05	
Total	26	3,06E-03			2,68E-03			1,54E-03		

* 3 tratamentos: compactação nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm
 $F_{tab} = 3,40283$

Tabela A.17. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de γ_s obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

	α	5%	1%	α	5%	1%	α	5%	1%
	Δ	7,51E-03	9,66E-03	Δ	6,75E-03	8,68E-03	Δ	7,74E-03	9,95E-03

		$h_{ot} - 3\%$			h_{ot}			$h_{ot} + 2\%$		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Médias		1,36	1,34	1,36	1,42	1,41	1,40	1,38	1,37	1,38
3 camadas	1		<u>2,02E-02</u>	3,57E-03		<u>1,68E-02</u>	<u>1,86E-02</u>		5,16E-03	5,39E-03
1 camada	2	<u>2,02E-02</u>		<u>1,66E-02</u>	<u>1,68E-02</u>		1,76E-03	5,16E-03		<u>1,06E-02</u>
2 camadas	3	3,57E-03	<u>1,66E-02</u>		<u>1,86E-02</u>	1,76E-03		5,39E-03	<u>1,06E-02</u>	

Tabela A.18. Análise de variância aplicada aos resultados de RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

FV	gl	$h_{ot} - 3\%$			h_{ot}			$h_{ot} + 2\%$		
		SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal
Tratamentos*	2	14766,71	7383,36	<u>21,83</u>	7094,90	3547,45	<u>16,29</u>	1790,26	895,13	<u>8,78</u>
Resíduo	24	8118,44	338,27		5224,88	217,70		2446,74	101,95	
Total	26	22885,16			12319,78			4237,01		

* 3 tratamentos: compactação nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm
 $F_{tab} = 3,40283$

Tabela A.19. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de RCNC obtidos para o Solo 1, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

		α	5%	1%	α	5%	1%	α	5%	1%
		Δ	21,64	27,83	Δ	17,36	22,33	Δ	11,88	15,28
		$h_{ot} - 3\%$			h_{ot}			$h_{ot} + 2\%$		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Médias		375,30	429,03	384,95	265,41	271,06	234,19	144,23	147,28	128,69
3 camadas	1		<u>53,72</u>	9,64		5,65	<u>31,21</u>		3,05	15,54
1 camada	2	<u>53,72</u>		<u>44,08</u>	5,65		<u>36,86</u>	3,05		<u>18,60</u>
2 camadas	3	9,64	<u>44,08</u>		<u>31,21</u>	<u>36,86</u>		15,54	<u>18,60</u>	

Tabela A.20. Análise de variância aplicada aos resultados de γ_s obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

		$h_{ot} - 3\%$			h_{ot}			$h_{ot} + 2\%$		
FV	gl	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal
Tratamentos*	2	2,70E-04	1,35E-04	<u>3,47</u>	6,24E-04	3,12E-04	2,55	8,23E-04	4,12E-04	<u>6,28</u>
Resíduo	24	9,33E-04	3,89E-05		2,93E-03	1,22E-04		1,57E-03	6,56E-05	
Total	26	1,20E-03			3,56E-03			2,40E-03		

* 3 tratamentos: compactação nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm
 $F_{tab} = 3,40283$

Tabela A.21. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de γ_s obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

		α	5%	1%	α	5%	1%
		Δ	7,34E-03	9,44E-03	Δ	9,53E-03	1,23E-02
		$h_{ot} - 3\%$			$h_{ot} + 2\%$		
		1	2	3	1	2	3
Médias		1,68	1,68	1,68	1,68	1,69	1,68
100 mm	1		4,27E-03	3,45E-03		<u>1,30E-02</u>	3,39E-03
35 mm	2	4,27E-03		<u>7,73E-03</u>	<u>1,30E-02</u>		<u>9,65E-03</u>
73 mm	3	3,45E-03	<u>7,73E-03</u>		3,39E-03	<u>9,65E-03</u>	

Tabela A.22. Análise de variância aplicada aos resultados de RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

FV	gl	h _{ot} - 3%			h _{ot}			h _{ot} + 2%		
		SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal	SQ	QM	Fcal
Tratamentos*	2	3930,97	1965,49	<u>71,03</u>	370,93	185,47	<u>6,21</u>	19,03	9,51	0,12
Resíduo	24	664,13	27,67		716,38	29,85		1954,18	81,42	
Total	26	4595,10			1087,31			1973,21		

* 3 tratamentos: compactação nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

F_{tab} = 3,40283

Tabela A.23. Teste Tukey aplicado para subsidiar a ANOVA realizada utilizando resultados de RCNC obtidos para o Solo 2, empregando-se corpos-de-prova compactados nos diâmetros de 35 mm, 73 mm e 100 mm

		α	5%	1%	α	5%	1%
		Δ	6,19	7,96	Δ	6,43	8,27
		h _{ot} - 3%			h _{ot}		
		1	2	3	1	2	3
Médias		142,46	116,76	116,96	96,16	95,79	88,12
100 mm	1		<u>25,70</u>	<u>25,50</u>		0,37	<u>8,04</u>
35 mm	2	<u>25,70</u>		0,20	0,37		<u>7,67</u>
73 mm	3	<u>25,50</u>	0,20		<u>8,04</u>	<u>7,67</u>	