

# Análise microestrutural de um perfil de solo tropical compactado

John Fredy Burgos Lopera

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, Johnburgos517@gmail.com

José Camapum de Carvalho

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, camapumdecarvalho@gmail.com

Claudia Gomez Muñoz

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, clamago25@gmail.com

**RESUMO:** Na geotecnia o comportamento dos materiais é estudado, geralmente, considerando-se suas características. As diferentes interações entre as componentes de um material atuam nas respostas que esse material apresenta sob diferentes situações de solicitação, tornando-se relevante compreender essas componentes e como elas interagem, entender a sinergia entre fenômenos, solicitação e estrutura. A principal motivação é colocar em destaque a importância de conhecer a microestrutura dos solos tropicais, a fim de ajudar na compreensão dos resultados de ensaios e comportamentos do solo. Nesta pesquisa estudou-se um perfil de solo tropical. Foram realizados ensaios de caracterização física, ensaios de compactação e a análise microestrutural de amostras de solo natural e compactado. Uma das amostras estudadas é do tipo laterítico coletada a 2 m de profundidade e a outra do tipo saprolítico retirada a 11m de profundidade. Analisou-se a influência do processo de compactação na microestrutura comparando-se os métodos estático e dinâmico e em estado natural. Avalia-se no estudo a aplicabilidade da teoria proposta por William Lambe (1958) sobre a relação entre a condição de compactação e a microestrutura do solo. Esse modelo, proposto com base em estudos realizados sobre solos oriundos de regiões temperadas, requer uma avaliação considerando-se o perfil de intemperismo tropical, tendo em vista que nesse caso as partículas contidas nos agregados e em menor escala nos pacotes de argila possuem menor liberdade para o rearranjo que as partículas individualizadas presentes nos solos sedimentares de região temperada. Salienta-se que os solos tropicais profundamente intemperizados já se distinguem dos demais por sua estrutura no estado natural o que realça a importância de suas avaliações estruturais quando compactados. O artigo mostra a importância de se considerar o intemperismo sofrido pelo solo tropical na avaliação de suas propriedades e comportamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Intemperismo, compactação, estrutura, solos tropicais.

## 1 INTRODUÇÃO

Na área geotécnica, as análises de comportamento destacam como necessidade o estudo das características mecânicas e hidráulicas e o entendimento da estrutura e microestrutura do solo. Os solos de um modo geral, mas, mais especificamente os solos finos, apresentam comportamento hidromecânico diretamente relacionado às suas estruturas. Portanto, é importante conhecer a origem do

solo e sua estrutura, assim como conhecer as alterações sofridas pela estrutura devido aos processos de formação e de compactação e como eles influenciam o comportamento mecânico e hidráulico. A compactação dos solos objetiva a melhoria do comportamento por meio da redução do volume de vazios. Essa redução de volume de vazios pode se dar como consequência do simples arranjo estrutural, saída de fluidos ou mudanças na granulometria.

Os tipos de estrutura, floclada no ramo seco, dispersa no ramo úmido que se amplia

com a energia de compactação são apresentadas por Lambe (1958) e se fundamentam em estudos realizados sobre solos oriundos de região temperada. No entanto, essa proposta não se adequa aos solos tropicais em especial aos profundamente intemperizados. Para entender as limitações dessa teoria quando aplicada aos solos tropicais, faz-se necessário conhecer a origem do solo, sua composição químico-mineralógica e sua microestrutura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Solos tropicais: mineralogia e microestrutura.

Um dos fenômenos formadores dos solos é o intemperismo. De acordo com Pedro & Melfi (1983) o fenômeno pode ser diacrônico em locais com climas úmido e frio a temperado, onde acontece alteração dos minerais mais vulneráveis (feldespato, micas) e pouca produção de minerais secundários (argilominerais), formando camadas de solo pouco espessa. Também pode ser sincrônico em locais úmidos e quentes como é o caso da região tropical originando alta alteração dos minerais primários e geração abundante de minerais secundários ou argilominerais assim como de óxidos e hidróxidos ferro e alumínio propiciando a formação de camadas de solo espessas. É evidente que em um perfil de intemperismo presente em climas quentes e úmidos as camadas menos intemperizadas assumem a característica diacrônica e as mais intemperizadas a sincrônica sem que, no entanto, se fixe esse estado como algo *ad eternum*.

O intemperismo envolve um conjunto de modificações físicas e/ou químicas propiciadas pelo clima e/ou ações biológicas. A ação químico-biológica nos solos tropicais é a grande responsável pelo processo de intemperização promovendo hidrólises, lixiviação, acumulação e oxidação, entre outros. Nos solos tropicais o intemperismo químico gera lixiviação dos álcalis (K, Mg, Na, Ca, etc.) mantendo em especial o Al, Fe e o Si, assim, se favorece a formação de agregados dando origem a uma estrutura porosa bem drenada. No Distrito Federal o intemperismo origina a formação de

argilominerais como caolinita, e ilita e significativa presença de óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, em especial gibbsita, goethita e hematita. A estrutura do solo gerada no processo de formação confere a ele uma distribuição de poros bimodal com presença marcante de macro e de microporos. Os macroporos são geralmente responsáveis por sua elevada colapsibilidade. Quando da compactação desses solos reduz-se a macroporosidade preservando-se, no entanto a microporosidade como mostra (Farias *et al.*, 2011). Cardoso (1995) ao estudar o fenômeno do colapso mostrou que para os solos profundamente intemperizados do Distrito Federal a sua origem residual ou transportada não é relevante para o comportamento mecânico.

Os óxidos e hidróxidos são geralmente compostos amorfos, abundantes nos solos tropicais, com alto poder de agregação atuando como agente cimentante. Eles são neutros ou carregados positivamente, têm geralmente alta superfície específica, não são expansivos, não possuem plasticidade, são pouco ativos e apresentam baixa capacidade de troca catiônica (Grim, 1962).

A ação do intemperismo responsável pelas alterações mineralógicas e definição da estrutura dos solos profundamente intemperizados diminui com a profundidade até encontrar o solo saprolítico, o saprolito e finalmente a rocha mãe (Grim, 1962). No saprolito o intemperismo químico já é pequeno e predomina a ação da física e/ou pedogêneses. Segundo Vargas, (1978) a pedogêneses é um processo de alteração dos solos transformando-os química, física e estruturalmente.

### 2.2 Iterações solo-água

De acordo com Grim (1962), o principal fator que interage na estrutura e no comportamento do solo é a quantidade de água. Ela pode estar na superfície das partículas ou nos poros do solo gerando agregação. Nos solos tropicais profundamente intemperizados essas agregações já existem naturalmente a nível macro e micro. Pode estar na microestrutura entre os minerais interagindo com eles e estabelecendo a interação

entre eles, e pode estar integrando a composição dos minerais. A primeira condição da água, na macroestrutura, requer pouca energia para ser retirada do solo, no entanto, as duas seguintes precisam de energia maior para ser removidas. A primeira condição se relaciona, sobretudo à capilaridade, sendo, portanto, de natureza predominantemente física, porém, a segunda está ligada à adsorção e constitui-se em fenômeno de natureza predominantemente eletroquímica. Essas diferentes condições em que se encontra a água interferem no comportamento hidromecânico do solo, especialmente em solos tropicais onde a interação da água pelas condições químicas é diferente e a condição da camada dupla é bem complexa.

### 2.3 Estruturas nos solos naturais e compactados

A estrutura dos solos naturais pode encontrar-se atrelada à rocha de origem ou à sua origem propriamente dita (sedimentar ou residual) e aos processos de intemperismo pelos quais passou. Em regiões tropicais a estrutura do solo altera-se ao longo do perfil de intemperismo. Estruturalmente o perfil de intemperismo pode ser dividido em quatro zonas: solo profundamente intemperizados geralmente com estrutura macroporosa com presença marcante de agregados contendo microporos em seus interiores o que no todo confere ao solo uma distribuição de poros bimodal; solo de transição contendo porções mais e menos intemperizadas com significativa variação estrutural; solo saprolítico que já é geralmente um solo fino com estrutura próxima à da rocha de origem sendo a distribuição de poros uniforme ou bem graduada; saprolito material contendo fragmentos mais preservados da rocha mãe. Mineralogicamente a primeira zona é geralmente rica em caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio; a segunda apresenta minerais da primeira zona, mas também argilominerais 2:1 como as ilitas, e montmorilonita; a terceira zona é rica em siltes e alguns argilominerais 2:1, mas apresenta também minerais primários e na quarta zona os fragmentos preservados da rocha mãe ressaltam os minerais primários.

Nos solos profundamente intemperizados, a estrutura bimodal originária tende a desaparecer à medida que se amplia a energia de compactação por meio do desaparecimento da macroporosidade. Nesses solos também não existe diferença marcante entre solos compactados no ramo seco e no ramo úmido da curva de compactação, pois os agregados são quase sempre preservados. Já os solos pouco intemperizados, solos saprolíticos finos, tendem a seguir a teoria de Lambe (1958) quanto à alteração estrutural em função da energia e umidade de compactação.

## 3 METODOLOGIA

Com intenção de avaliar o intemperismo no horizonte tropical laterítico, escolheu-se a profundidade de 2m. Já para análises do solo saprolito estudou-se o solo proveniente da profundidade 11m. Realizaram-se ensaios necessários para classificação e caracterização. A mineralogia foi obtida da literatura (Guimarães, 2002). A partir do conjunto de resultados obtidos determinaram-se os coeficientes e índices, como índice de plasticidade ( $I_p$ ), índice de atividade ( $I_a$ ), índice de vazios ( $e$ ), porosidade ( $n$ ), grau de saturação ( $S_r$ ) e índice de consistência ( $I_c$ ). Além disso, foram determinadas as densidades e outros parâmetros úteis ao se descrever o solo e analisar seu comportamento como as variáveis de classificação do MCT.

Realizou-se a compactação dos solos com energias equivalentes ao Proctor normal, intermediário e modificado. Os métodos de compactação foram o método dinâmico e estático, avaliou-se a condição ótima, o ramo seco e o ramo úmido. Para a compactação Proctor nas três energias utilizou-se o cilindro pequeno e o solo compactado em três camadas. A compactação estática foi realizada numa velocidade de 1mm/min usando uma prensa mecanizada.

Para todas as amostras, naturais e compactadas, realizaram-se análises microscópicas. Análise qualitativa da textura, cor, grãos, homogeneidade e aparência para as imagens das lupas ópticas nos aumentos de 100, 200, e 400 vezes. Análises quantitativas dos

poros e das partículas por meio do uso de imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) com ampliações de 100, 200, 500, 1.000, 5.000, 10.000 e 20.000 vezes. As análises foram direcionadas para a avaliação da porosidade, a níveis macro e microestruturais buscando-se avaliar a distribuição dos poros, assim como às condições de distribuição e arranjo das partículas e composição químico-mineralógica. As análises quantitativas da porosidade foram realizadas com o programa Imagej de livre acesso, que permite observar as magnitudes de determinadas componentes de uma imagem.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Análise química, mineralógica e estrutural.

A mineralogia do perfil de solo estudado foi caracterizada a cada metro por Carvalho (1995) entre as profundidades de 1m e 10 m. A Tabela 1 apresenta a composição mineralógica para as profundidades de 2 m e 10 m. Para a profundidade de 11 m a composição mineralógica não deve diferir muito da obtida para a profundidade de 10 m. Esses resultados realçam o acentuado nível de intemperismo sofrido pelo solo a 2 m de profundidade, onde aparece um teor elevado de gibbsita (41,7%), pouca caulinita (6,9%) e nenhuma ilita. O teor de hematita somado ao de goethita ao longo de todo o perfil não varia muito se situando entre 10,3% e 14,4%, sendo que a partir de 5 m a goethita não se faz mais presente. Na profundidade de 10 m já não ocorre gibbsita, o teor de caulinita é elevado (37,1%) e o teor de ilita se amplia para 11,2%. Considerando-se o perfil de intemperismo como um todo (Guimarães, 2002) espera-se para onze metros uma pequena elevação no teor de ilita e semelhante redução no teor de caulinita. Devido ao processo de lixiviação e a configuração da origem, os horizontes dentro do perfil tropical são pouco diferenciados, com variação no teor de argila e quase ausência das bases Ca, Mg, K, Na e SiO<sub>2</sub>, caracterizando-se pela predominância de argilominerais da família 1.1 tipo caulinita e alta presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio Figura 4.1, além

de materiais em avançado estado de intemperismo que apresentam uma estrutura porosa, com comportamento do solo tropical governado pela alta agregação e fortes cimentações. Na Figura 4.1 se observa com a queda do nível de intemperismo ao longo do perfil que a relação entre o pico de alumínio e de silício diminui com o aumento da profundidade, o que se explica pela presença de gibbsita nas profundidades de 2 m e 5 m e o seu desaparecimento a 8 m onde já começam a aparecer argilominerais 2:1 e minerais primários.

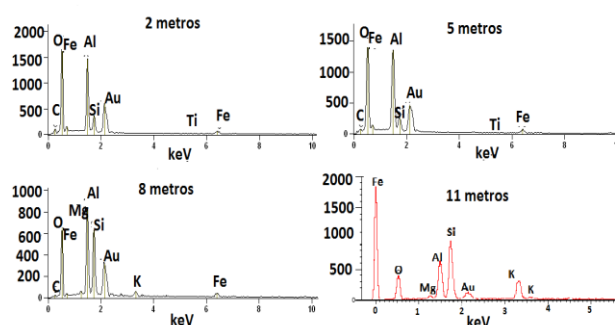


Figura 4.1 Variação química no perfil.

### 4.2 Propriedades físicas

A Tabela 4.1 apresenta as propriedades físicas dos solos estudados para as duas profundidades, 2 m e 11,6 m. Observa-se a alta porosidade e menor plasticidade no solo mais superficial com maior nível de intemperização coletado a 2 m de profundidade.

O índice de consistência obtido para as duas profundidades apontam para a maior rigidez do solo laterítico coletado a 2 m de profundidade,  $I_c = 1,07$  em relação à do solo saprolítico,  $I_c = 0,33$ . Se observado o grau de saturação registrado para as duas profundidades, além da influência das diferenças químicas mineralógicas e estruturais certamente essa diferença está também refletindo o efeito da sucção. Cabe, porém destacar que esse tipo de índice tem que ser visto com cuidado quando se trabalha com solos tropicais, pois mesmo o solo saprolítico que seria classificado como de consistência plástica mole, não corresponderia exatamente esse estado. Por exemplo, em termos de SPT obteve para a profundidade de 2 m um valor médio de 3 golpes e para a profundidade de 11 m um valor médio de 16 golpes.

A plasticidade de ambos os solos estão relacionadas com suas mineralogias, estrutura e concentração de óxidos e hidróxidos em especial os de ferro (Cardoso 2002). No saprolito os altos valores de Gs derivam-se da mineralogia e ela influi no comportamento. As análises granulométricas mostradas na Figura 4.2 e Tabela 4.2 apresentam a grande agregação existente no solo laterítico quando se observa a diferença entre a curva com e sem defloculante, fazendo sobressair seu estado agregado. Já o solo saprolítico no qual tais agregações inexistem, não apresenta diferenças significativas entre as duas curvas.

Observa-se ainda das curvas granulométricas que se excetuando o teor de argila no ensaio com defloculante, o solo saprolítico tem uma textura mais fina que o solo laterítico. Isso provavelmente se deve a um maior teor relativo de quartzo residual nas camadas mais superficiais.

Tabela 4.1 Propriedades físicas e mineralógicas.

| Mineralogia                            |          |            |            |          |          |           |        |       |
|----------------------------------------|----------|------------|------------|----------|----------|-----------|--------|-------|
| Profundidade [m]                       | Gibbsite | Caolinita  | Quartzo    | Hematita | Goethita | Anastasio | Rutilo | Ilita |
| 2                                      | 41,7     | 6,9        | 29,4       | 6,9      | 3,4      | 6,9       | 4,9    | 0     |
| 11                                     | 0        | 37,1       | 22,5       | 14,1     | 0        | 0         | 0      | 11,2  |
| Propriedades físicas                   |          |            |            |          |          |           |        |       |
| Profundidade [m]                       | om [%]   | Y' [kN/m3] | Yd [kN/m3] | Gs       | e        | n [%]     | Sr [%] |       |
| 2                                      | 25,3     | 13,4       | 10,7       | 2,73     | 1,55     | 60,8      | 47     |       |
| 11                                     | 32,0     | 18,6       | 14,0       | 2,94     | 1,10     | 52,4      | 86     |       |
| Limites de Atterberg e índices físicos |          |            |            |          |          |           |        |       |
| Profundidade [m]                       | Lp [%]   | LI [%]     | Ip [%]     | Ia       | II       | Ic        |        |       |
| 2                                      | 27       | 36         | 9          | 0,19     | -0,07    | 1,07      |        |       |
| 11                                     | 25       | 36         | 11         | 0,14     | 0,67     | 0,33      |        |       |

Tabela 4.2 Granulometria e classificação

| Pz [m] | Pedregulho grosso | Pedregulho médio | Pedregulho fino | areia grossa | areia média | areia fina | silt  | argila | passa 200 | USCS  | Ig | AASHTO | MCT      | carta casagrande |
|--------|-------------------|------------------|-----------------|--------------|-------------|------------|-------|--------|-----------|-------|----|--------|----------|------------------|
| 2      | 0,00              | 0,00             | 3,54            | 0,60         | 5,22        | 28,86      | 27,65 | 34,12  | 82,59     | ML-CL | 8  | A-4    | IA-IA'   | CL               |
|        | 0,00              | 0,00             | 3,54            | 2,26         | 16,76       | 33,79      | 37,15 | 6,50   | 51,57     | ML    | 3  | A-4    | IA-IA'   | CL               |
| 11     | 0,00              | 0,00             | 0,04            | 0,06         | 0,44        | 5,24       | 76,48 | 17,74  | 98,11     | ML    | 12 | A-4    | NA/NG/NS | CL               |
|        | 0,00              | 0,00             | 0,04            | 0,09         | 0,66        | 6,90       | 81,08 | 11,23  | 98,90     | ML    | 12 | A-4    | NA/NG/NS | CL               |

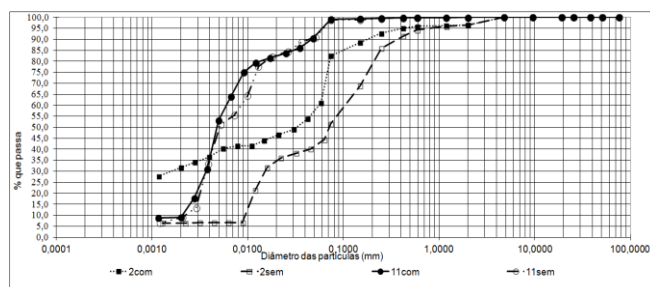


Figura 4.2 Curvas granulométricas

Como se observa na Figura 4.2 as classificações internacionais baseadas em solos

de regiões temperadas não apresentam diferença classificatória entre os dois solos estudados, embora eles sejam diferentes no que tange às propriedades, físicas, químicas e mineralógicas e quando ao comportamento mecânico como mostram as curvas de compactação (Figura 4.3). Destaca-se, porém, que na metodologia MCT os solos recebem classificação distinta, sendo o solo proveniente da profundidade de 2m classificado como laterítico e a oriunda da profundidade de 11 m como solo não laterítico.

Na Tabela 4.2 são apresentados para ambos os solos os resultados de compactação nas energias equivalentes ao Proctor normal, intermediário e modificado. Nessa figura são apresentados resultados de compactação dinâmica (PN, PI, PM) e estática (PNE, PIE, PME). A compactação estática foi realizada fazendo-se uso de uma prensa a velocidade controlada (1 mm/min) na qual se impunha um energia de compactação crescente até atingir o peso específico igual ao obtido para quando da compactação dinâmica.

Cabe destacar que as amostras compactadas não passaram por processo de pré-secagem, partindo-se sempre da umidade natural. Observa-se dos resultados mostrados nessa figura maior variação no índice de vazios mínimo correspondente ao peso específico aparente seco máximo no solo laterítico que no solo saprolítico ao se passar da energia equivalente ao Proctor normal para a equivalente ao Proctor modificado. No caso do solo laterítico com o aumento da energia a umidade ótima tende a apresentar maior redução que o solo saprolítico. Essa diferença de comportamento entre os dois solos está aparentemente associada à textura, estrutura e à composição química mineralógica.

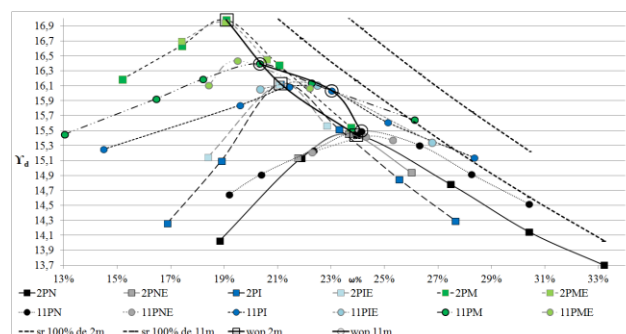


Figura 4.3 Curvas de compactação

Observa-se na Figura 4.3 que o solo laterítico coletado a 2 m de profundidade apresenta tanto o ramo seco como o ramo úmido com inclinação mais íngreme que o solo saprolítico. As variações de inclinação no ramo seco podem ocorrer especialmente devido a dois fatores, quebra de agregados e grãos e variação de sucção e no ramo úmido devido a pressões neutras geradas (Villar *et al.* 2015). Para os solos em discussão, no caso dos solos lateríticos o ramo seco apresenta variações de sucção mais significativas que o solo saprolítico e no ramo úmido é provável que deformações dos agregados no solo laterítico provoquem um maior fechamento dos poros e geração de pressão neutra com o aumento da umidade, superior à gerada no solo saprolítico. Situando as faixas de variação da umidade nas curvas de compactação nas curvas características apresentadas na Figura 4.4 constata-se que as diferenças nas formas das curvas de compactação existentes entre os dois materiais, em especial no ramo seco estão associadas as variações de sucção com as modificações nos teores de umidade de compactação.

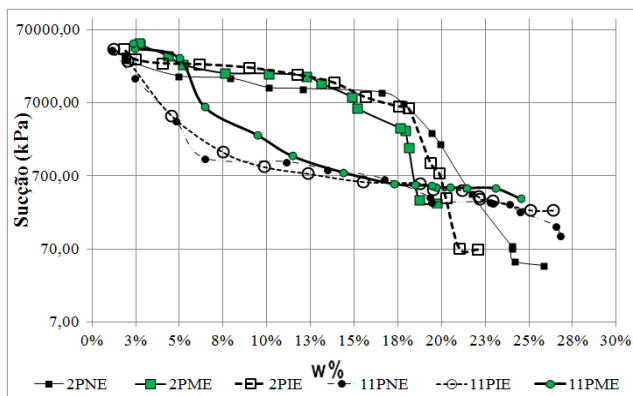


Figura 4.4 Curvas características

### 4.3 Análise microestrutural

Para amostras naturais e aumento de 5.000 vezes, a Figura 4.55 exibe para a profundidade de 2 m uma estrutura agregada com microporos em seus interiores e macroporos entre os agregados, o que lhe confere uma distribuição de poros bimodal. Para a profundidade de 11,6 m as partículas apresentam-se isoladas ou formando pacotes de argila com orientação aleatória marcando uma distribuição de poros

monomodal.

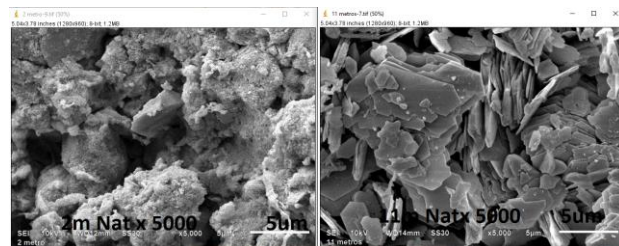


Figura 4.5 Microscopia solos em estado natural 2 vs 11m

A Figura 4.6 mostra que aplicando-se um menor nível de aumento (200 vezes em lugar de 5.000 vezes) sobressaem os agregados e macroporos presentes no solo laterítico enquanto no solo saprolítico a porosidade aparenta mais uniforme e sem a presença de macroporos.

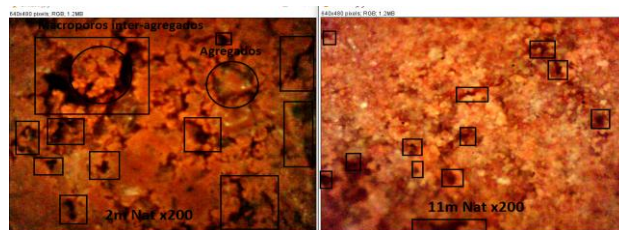


Figura 4.6 Configuração macroestrutural do solo natural

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram que para a profundidade de 2 m no perfil laterítico tem-se alta agregação e distribuição irregular na macroporosidade com presença também de mesoporos. Os microporos presentes nos agregados apresentam tendência à distribuição uniforme dos poros o que conduz a certa horizontalidade da curva característica nesse trecho da curva (Figura 4.4). No saprolito as agregações dão lugar aos pacotes de argila, gerando nestes pacotes poros menores que aqueles existentes entre as partículas de argila isoladas e entre estas e os pacotes de argila.

Objetivando avaliar a distribuição de poros dos solos nas profundidades estudadas fez-se a análise de imagens com as amostras submetidas a diferentes aumentos. Observou-se com base em avaliações de áreas de poros (Figura 4.7), que no solo laterítico ao se ampliar a imagem os macroporos perdem em representatividade conduzindo a uma redução na porcentagem de vazios em relação área total observada. A partir de um determinado nível de aumento os

macroporos deixam de serem representativos e começa a ampliar a área de vazios dos microporos em relação a área total. Essa representação dos macroporos e microporos do solo laterítico concorda com sua distribuição de poros bimodal. Já no solo saprolítico o que se observa é certa dispersão nos resultados apontando para uma maior uniformidade na distribuição dos poros, dentro, evidentemente, de certa faixa geradora da dispersão observada.

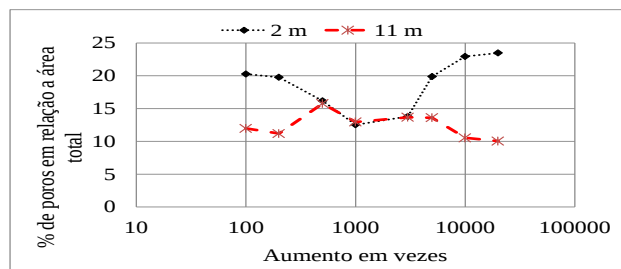


Figura 4.7 Avaliação da porosidade nos solos em estado natural

A variação na porosidade gerada pela compactação do solo oriundo do horizonte laterítico é maior que a do horizonte saprolítico como mostraram as curvas de compactação (Figura 4.3). Devido à distribuição de poros distinta nos dois materiais torna-se mais nítido os efeitos da compactação nas imagens se observadas as estruturas em escalas de aumento distintas. Com isso optou-se por apresentar para o solo laterítico imagens com aumento de 100 vezes por permitirem melhor visualização das alterações de macroporosidade e para o solo saprolítico com aumento de 5000 vezes, pois só com essa ampliação mínima foi possível visualizar melhor as alterações estruturais.

No solo lateríticos (Figuras 4.8 A, B e C) observa-se um maior fechamento da macroporosidade na umidade ótima de compactação. Observa-se também que no ramo úmido a estrutura apresenta um maior fechamento e obstrução da macroporosidade, embora não se possa falar dos fenômenos de floculação ou agregação nesses casos. Essa obstrução da macroporosidade no ramo úmido se reflete nas análises de porosidade de superfície mostradas na tabela 4.2 quando analisada a imagem para menor nível de aumento (500 vezes), no entanto, quando ampliada a imagem verifica-se o esperado, maior

porosidade para o solo compactado no ramo seco e úmido em relação ao solo compactado na umidade ótima.

No solo saprolítico (Figuras 4.8 D, E e F) observa-se um ligeiro maior fechamento da porosidade na umidade ótima de compactação e no ramo úmido uma estrutura um pouco mais aberta que no ramo seco. Embora nesse solo pudesse ter lugar os fenômenos da agregação e orientação de partículas não se observa com clareza esse fenômeno mesmo para esse solo compactado dinamicamente na energia Proctor modificado. Nesse solo as análises das imagens considerando-se as áreas em superfície não levam a observações conclusivas sobre o real impacto da compactação na microestrutura (Tabela 4.2).

Comparando-se as imagens da Figura 4.8 com as da Figura 4.5 é possível observar o fechamento da porosidade em ambos os solos.

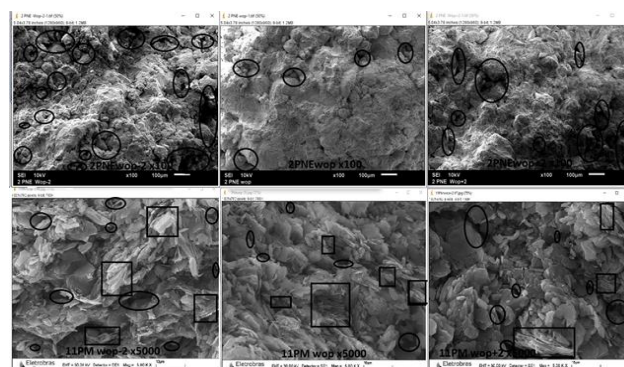


Figura 4.8 Condições microestruturais compactadas

Tabela 4.3 Avaliação quantitativa solos compactados

| Profundidade de aumento e estado | Estado     | Compactação dinâmica   |                     |                   | Compactação estática |                        |                     |
|----------------------------------|------------|------------------------|---------------------|-------------------|----------------------|------------------------|---------------------|
|                                  |            | Área de poros Ap [μm²] | Área total At [μm²] | Relação Ap/At [%] | Estado               | Área de poros Ap [μm²] | Área total At [μm²] |
| 2mx500                           | 2PN Wop    | 5493,75                | 46875,00            | 11,7              | 2PNE wop             | 5683,69                | 48371,86            |
| 2mx500                           | 2PN wop -2 | 6686,79                | 51595,57            | 13,0              | 2PNE Wop-2           | 6644,93                | 49148,85            |
| 2mx500                           | 2PN wop +2 | 6085,18                | 48371,86            | 12,6              | 2PNE Wop+2           | 6650,67                | 51595,57            |
| 2mx500                           | 2PI wop    | 5006,80                | 48749,14            | 10,4              | 2PIE Wop             | 5093,95                | 45441,10            |
| 2mx500                           | 2PI Wop -2 | 5512,54                | 50760,08            | 10,9              | 2PIE wop-2           | 5504,08                | 47613,14            |
| 2mx500                           | 2PI wop +2 | 5553,44                | 48374,91            | 11,5              | 2PIE wop+2           | 7800,08                | 49152,00            |
| 2mx500                           | 2PM wop    | 3931,91                | 49148,85            | 8,0               | 2PME wop             | 4442,20                | 49139,42            |
| 2mx500                           | 2PM wop -2 | 4245,30                | 49944,72            | 8,5               | 2PME wop-2           | 4674,36                | 49152,00            |
| 2mx500                           | 2PM wop +2 | 4039,05                | 48371,86            | 8,4               | 2PME wop+2           | 4649,78                | 49152,00            |
| 2mx10000                         | 2PN Wop    | 10,60                  | 113,61              | 9,3               | 2PNE Wop             | 13,26                  | 127,89              |
| 2mx10000                         | 2PN wop -2 | 13,26                  | 133,28              | 10,0              | 2PNE Wop-2           | 12,72                  | 113,57              |
| 2mx10000                         | 2PN wop +2 | 10,24                  | 122,83              | 8,3               | 2PNE Wop+2           | 12,58                  | 113,61              |
| 2mx10000                         | 2PI wop    | 10,95                  | 145,18              | 7,5               | 2PIE Wop             | 15,87                  | 133,28              |
| 2mx10000                         | 2PI Wop -2 | 11,10                  | 122,88              | 9,0               | 2PIE wop-2           | 13,59                  | 133,33              |
| 2mx10000                         | 2PI wop +2 | 11,28                  | 133,28              | 8,5               | 2PIE wop+2           | 12,99                  | 127,95              |
| 2mx10000                         | 2PM wop    | 15,07                  | 122,68              | 12,3              | 2PME Wop             | 14,10                  | 109,36              |
| 2mx10000                         | 2PM wop -2 | 15,23                  | 127,95              | 11,9              | 2PME wop-2           | 15,75                  | 118,06              |
| 2mx10000                         | 2PM wop +2 | 15,73                  | 127,89              | 12,3              | 2PME wop+2           | 17,19                  | 133,28              |
| 11mx600                          | 11PNwop    | 20552,8                | 254997,2            | 8,1               | 11PNEwop             | Sem                    | sem                 |
| 11mx600                          | 11PNwop-2  | 22520,2                | 262779,4            | 8,6               | 11PNEwop-2           | Sem                    | sem                 |
| 11mx600                          | 11PNwop+2  | 24316,3                | 269881,2            | 9,0               | 11PNEwop+2           | 25362,8                | 259333,2            |
| 11mx600                          | 11PIwop    | 30316,0                | 259333,2            | 11,7              | 11PIEwop             | 33161,3                | 262767,9            |
| 11mx600                          | 11PIwop-2  | 19761,0                | 262779,4            | 7,5               | 11PIEwop-2           | 19858,3                | 262675,7            |
| 11mx600                          | 11PIwop+2  | 19524,5                | 262779,4            | 7,4               | 11PIEwop+2           | 23334,8                | 262779,4            |
| 11mx600                          | 11PMwop    | 15844,5                | 266294,8            | 6,0               | 11PMEwop             | 17761,1                | 266283,0            |
| 11mx600                          | 11PMwop-2  | 17115,2                | 259321,9            | 6,6               | 11PMEwop-2           | 17558,5                | 255954,3            |
| 11mx600                          | 11PMwop+2  | 20285,7                | 262767,9            | 7,7               | 11PMEwop+2           | Sem                    | sem                 |
| 11mx10000                        | 11PNwop    | 95,5                   | 958,7               | 10,0              | 11PNEwop             | Sem                    | sem                 |
| 11mx10000                        | 11PNwop-2  | 67,8                   | 937,9               | 7,2               | 11PNEwop-2           | Sem                    | sem                 |
| 11mx10000                        | 11PNwop+2  | 95,4                   | 936,0               | 10,2              | 11PNEwop+2           | 96,9                   | 938,0               |
| 11mx10000                        | 11PIwop    | 82,2                   | 943,4               | 8,7               | 11PIEwop             | 88,5                   | 929,4               |
| 11mx10000                        | 11PIwop-2  | 86,3                   | 946,6               | 9,1               | 11PIEwop-2           | 91,3                   | 955,4               |
| 11mx10000                        | 11PIwop+2  | 84,2                   | 938,0               | 9,0               | 11PIEwop+2           | 91,4                   | 955,6               |
| 11mx10000                        | 11PMwop    | 72,0                   | 946,7               | 7,6               | 11PMEwop             | 84,5                   | 966,4               |
| 11mx10000                        | 11PMwop-2  | 72,5                   | 946,7               | 7,7               | 11PMEwop-2           | 84,6                   | 946,7               |
| 11mx10000                        | 11PMwop+2  | 75,5                   | 929,4               | 8,1               | 11PMEwop+2           | Sem                    | sem                 |

## CONCLUSÕES

O perfil de solo estudado apresenta três horizontes distintos, um produzido por alteração do intemperismo tropical, seguido de uma transição e o terceiro um residual jovem pouco alterado tendo o esse trabalho focado na análise do primeiro e do terceiro horizonte. Cabe lembrar que ao longo de cada um desses horizontes o solo passa por alterações estruturais e químico-mineralógicas, o que certamente conduz também a modificações no comportamento.

O horizonte laterítico caracterizado pela alta agregação e cimentação produto de seus altos conteúdos de minerais secundários, argilominerais, óxidos e hidróxidos, tem uma distribuição de poros bimodal. Enquanto o solo do horizonte saprolítico apresenta mais minerais primários e alguns argilominerais mais ativos da família 2.1 e uma distribuição de poros mais uniforme sem indícios de bimodalidade.

A compactação do solo laterítico altera a sua macroporosidade natural reduzindo-a, porém, a microporosidade tende a ser preservada. Com a compactação o comportamento bimodal do solo laterítico se reduz. Esse solo mostra-se bastante sensível a umidade de compactação.

O solo saprolítico tem reduzida a sua porosidade com a compactação mas não foram observadas alterações significativas na estrutura do solo compactado em função da energia e umidade de compactação.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília e ao LabMic da UFG e à FURNAS em Goiânia, pelas análises microscópicas. Ao CNPQ pelo apoio dado à realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Araki, M.S. (1997). Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal. Universidade de Brasília. pp. 121
- Cardoso, F. (1995). Análise química, mineralógica e micromorfológica dos solos tropicais colapsíveis e o estudo da dinâmica do colapso. Universidade de Brasília. pp. 139
- Cardoso, F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro. Universidade de Brasília. pp. 357
- Grim, R.E. (1962). Applied clay mineralogy. McGRAW HILLBOOK COMPANY INC.
- Guimarães, R. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavas. Universidade de Brasília. pp. 180
- Lambe, W. (1958). The structure of compacted clay. Boulder (Ed.), University of Colorado.
- Pedro & Melfi, A. (1983). Weathering of rocks and formation of soils. 2nd International Seminar on Lateritisation Processes, 3–11.
- Vargas, M. (1978). Introdução mecânica dos solos. McGRAW HILLBOOK COMPANY INC.
- Villar, L.F.S.; Guimarães, R.C.; Rodrigues, J.K.G.; Azevedo, R.F. & Camapum de Carvalho, J. (2015) Compactação dos solos: laboratório e campo. Livro Solos não saturados no contexto geotécnico. Organizadores Camapum de Carvalho, J.; Gitirana Junior, G.F.N.; Machado, S.L.; Mascarenha, M.M.A. & Silva Filho, F.C.. São Paulo: ABMS, pp. 257-296.