

DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA E A INFLUÊNCIA DOS MACRO E MICROPOROS EM UM PERFIL DE SOLO RESIDUAL

Determination of the characteristic curve and influence of macro and micropores on a residual soil profile

Fernando Carolino da Silva^a, Sabrina Marques Cabral^b, Renato Marques Cabral^c, José Camapum de Carvalho^a, Manoel Porfirio Cordão Neto^a, Renato Batista de Oliveira^d, Helmar Antônio Côrtes^d

^a Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

^b Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil

^c Universidade Estadual de Goiás, Brasil

^d Laboratório de Geotecnia em Furnas Centrais Elétricas S.A., Aparecida de Goiânia, Brasil

RESUMO – Para se compreender o comportamento dos solos não saturados uma das principais relações constitutivas utilizadas é sua curva característica. Nos solos tropicais a grande transformação pedogenética gera um elevado grau de agregação das partículas e uma característica de macroporosidade que é tanto mais acentuada quanto mais intemperizado é o solo. Este artigo tem por objetivo analisar a forma de se empregar dados obtidos para definição das curvas características por meio da placa de sucção, o papel filtro e o WP4C. A qualidade do ajuste dos dados obtidos para cada amostra de solo analisada a uma curva característica única é avaliada por meio do modelo proposto por Durner (1994). Complementarmente busca-se qualitativamente relacionar as formas das curvas características com a distribuição de poros dos solos analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura. Amostras foram coletadas do Campo Experimental na Universidade de Brasília. As análises realizadas mostram a coerência dos resultados obtidos por meio das três técnicas com a microestrutura dos solos e a adequabilidade do modelo de Durner e as curvas características obtidas.

SYNOPSIS – In order to understand the behaviour of unsaturated soils one of the main constitutive relations used is their characteristic curve. In tropical soils the great pedogenetic transformation generates a high degree of aggregation of particles and a characteristic of macroporosity that is all the more accentuated the more weathered the soil is. This article aims to analyze how to use data obtained to define the characteristic curves by means of the suction plate, the filter paper and the WP4C. The quality of the adjustment data obtained for each soil sample analyzed to a single characteristic curve is evaluated using the model proposed by Durner (1994). Complementarily, it is sought to qualitatively relate the shapes of the characteristic curves with the pore distribution of the analyzed soils by means of scanning electron microscopy. Samples were collected from the Experimental Field at the University of Brasília. The analyses performed show the coherence of the results obtained through the three techniques with the microstructure of the soils and the suitability of the Durner model and the characteristic curves obtained.

Palavras Chave – Curva Característica, Distribuição de Poros, Determinação Experimental.

Keywords – Characteristic Curve, Pore Distribution, Experimental Determination.

E-mails: fernandocarolinodasilva@hotmail.com (F. Silva), sabrinamarques02@hotmail.com (S. Cabral), renatocg@furnas.com.br (R. Cabral), camapum@unb.br (J. Carvalho), porfirio@unb.br (M. Neto), renatoba@furnas.com.br (R. Oliveira), helmarc@furnas.com.br (H. Côrtes)

1 – INTRODUÇÃO

Os solos tropicais não são apenas aqueles que se localizam entre os trópicos, mas aqueles que têm um comportamento hidromecânico e propriedades físico-químicas distintas dos solos sedimentares, em decorrência dos processos intemperísticos, típicos das regiões tropicais (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015a).

Um solo tropical é produzido pela ação do intemperismo, que se reflete como um conjunto de modificações físicas, químico-mineralógicas, desintegração e decomposição que alteram as propriedades e estrutura do solo, impactando diretamente em seu comportamento hidromecânico (Lopera, 2016).

As propriedades e comportamento dos solos tropicais estão quase sempre associados à microestrutura desenvolvida no processo de formação. Nas obras de engenharia e em especial nas geotécnicas, o comportamento dos materiais empregados é geralmente estudado considerando-se suas características macroscópicas e pouco se estuda sobre o aspecto microestrutural desses materiais e sua composição químico-mineralógica. Entretanto, além de analisar a macroestrutura, compreender a microestrutura do solo é relevante para definir suas propriedades e comportamento (Lopera, 2016).

O Distrito Federal é coberto por um manto de solo residual resultante de intemperismo, principalmente químico, associado a processos de lixiviação e laterização de idade Terciária/Quaternária (Mendonça *et al.*, 1994).

Segundo Guimarães (2002), subjacente ao solo residual profundamente intemperizado, geralmente se encontra um solo de transição caracterizado por elevada heterogeneidade de propriedades físico-químicas e mineralógicas. Em seguida, tem-se o solo saprolítico, no qual se observa menor porosidade, com uma estrutura marcada pela rocha de origem com presença de minerais neoformados e minerais primários.

Estes perfis de solo geralmente são divididos em quatro camadas: solos residuais profundamente intemperizados, solos de transição, solos saprolíticos e saprólitos. O solo profundamente intemperizado apresenta geralmente fração significativa de agregados. O tamanho e estabilidade desses agregados depende dentre outros do clima, da rocha de origem, da geomorfologia e da condição de drenagem, podendo atingir fração pedregulho e mesmo dar origem a formação rochosa laterítica.

A Figura 1 apresenta resultados obtidos por Roseno e Camapum de Carvalho (2007) usando granulômetro a laser para o solo coletado a 4 m de profundidade no mesmo local objeto do presente estudo. Observa-se nessa figura não só a presença marcante de agregados como também o fato de que a estabilidade estrutural dos agregados é afetada pela técnica usada na desagregação e esta deve guardar um elo com o objetivo do estudo, por exemplo, se ele se volta para estabilizações químicas e lagoas de estabilização é relevante o uso de defloculante, e se está voltado para a construção viária torna-se relevante o uso de ultrassom ou de ambos se na obra forem usados solos estabilizados quimicamente. Cabe destacar que em solos pouco intemperizados como os solos saprolíticos também ocorrem diferenças texturais entre amostras naturais e aquelas submetidas à ação de defloculantes e/ou ultrassom, no entanto, geralmente o fenômeno nestes solos passa da desagregação presente nos solos profundamente intemperizados para defloculação e/ou desempacotamento dos grupamentos de partículas, pois neles o mais frequente é a presença de pacotes de argila.

O comportamento mecânico e hidráulico dos solos está relacionado à sua estrutura, podendo ser dividida em macro e microestrutura. A macroestrutura diz respeito a observação do todo e a microestrutura ao arranjo estrutural dos grãos e partículas e dos próprios agregados formados nos solos tropicais. Os microporos caracterizam a estrutura interior dos agregados e os macroporos constituem os vazios entre os agregados. Os microporos podem se encontrar interconectados e se ligando aos macroporos ou isolados.

No caso dos solos tropicais, o intemperismo e a acidez são responsáveis pela formação de agregações de partículas cimentadas ou não por óxidos e/ou hidróxidos de alumínio e/ou ferro. Estas

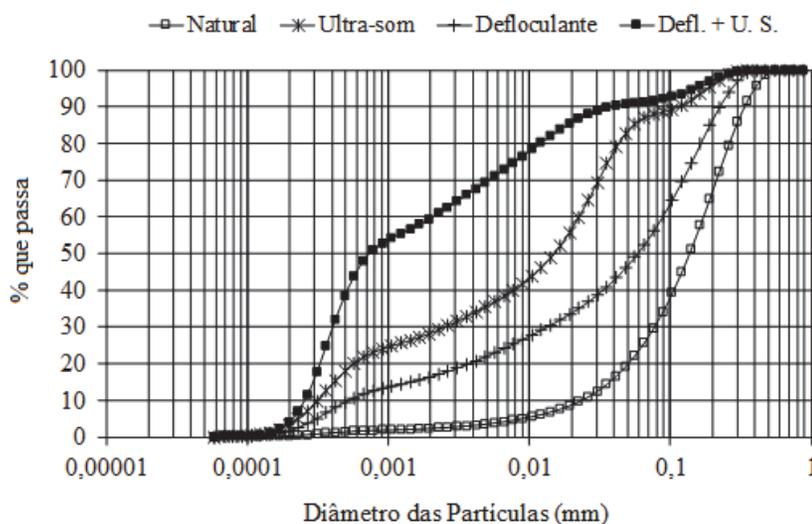


Fig. 1 – Influência da desagregação na textura do solo (modificado, Roseno e Camapum de Carvalho, 2007).

agregações por sua vez se ligam umas às outras formando macroporos, seja por estes mesmos cimentos, seja por pontes de argila, dando assim origem a distribuição bimodal de poros desse solo (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004).

Dada a importância das dimensões dos poros no comportamento de retenção de água pelos solos cabe destacar que Klein e Libardi (2002) consideram como macroporos, os poros de diâmetro (\varnothing) maior que 0,05 mm e como microporos, poros com \varnothing menor que 0,05 mm. Já Marcelo *et al.* (2016) fazem uma maior compartimentação do tamanho dos poros macroporos, poros com $\varnothing > 0,3\text{mm}$; mesoporos, poros com \varnothing entre 0,3 e 0,05 mm; microporos, poros com \varnothing entre 0,05 e 0,0002 mm e criptoporos, poros com $\varnothing < 0,0002$ mm.

As duas classificações são diferentes, sendo que a segunda considera os mesoporos nas dimensões dos macroporos da primeira e os criptoporos nas dimensões dos microporos. Nesse artigo será adotada a classificação sugerida por Klein e Libardi (2002), visto a dificuldade de analisar particular menores que 0,0002 mm.

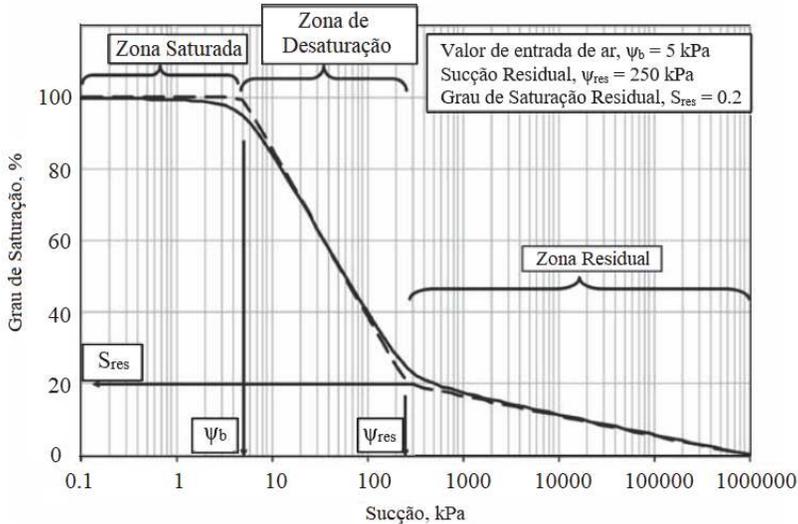
Considerando-se o perfil de intemperismo do Distrito Federal, geralmente se tem no solo profundamente intemperizado uma estrutura bimodal. O solo pouco intemperizado deste perfil de intemperismo comumente é marcado por uma distribuição de poros variando entre uniforme e bem graduada a depender, em especial da sua composição granulométrica e do próprio tipo e nível de intemperização físico-química e mineralógica sofridos. Já os solos de transição entre estas duas zonas são geralmente compostas por porções, muito intemperizadas, porções pouco intemperizadas e porções intermediárias, sendo com isto marcados por maior heterogeneidade estrutural, de propriedades físico-químicas e mineralógicas e de comportamento hidromecânico (Cardoso, 2002).

A curva característica de um solo expressa graficamente a capacidade de retenção de água que ele apresenta. Essa capacidade de retenção de água corresponde ao somatório dos efeitos osmótico, capilar e das forças de adsorção características dos minerais que o compõem. A literatura divide esses efeitos em sucção osmótica e sucção matricial e intitula o somatório desses dois efeitos como sucção total. No entanto, como a sucção matricial é geralmente tratada como um efeito capilar, termina não aparecendo de modo explícito o efeito das forças de adsorção que tem grande relevância na maioria das argilas, apesar de sua insignificância, do ponto de vista da engenharia, em minerais como o quartzo. Nesse artigo, optou-se por considerar simplesmente o entendimento clássico, ou seja, sucção total é igual a sucção osmótica mais a sucção mátrica devendo-se, no entanto, entender

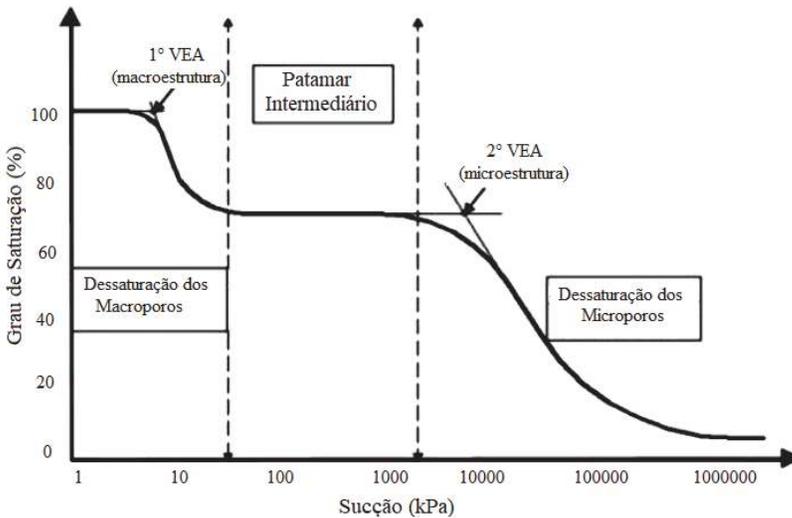
que medidas de sucção mátrica por meio de técnicas como a do papel filtro e célula ou placa de sucção compreendem os efeitos capilar e de forças de adsorção.

A Figura 2 mostra a mudança na forma da curva característica em função do estado estrutural do solo, comparando solos pouco e muito intemperizados. A curva característica representativa dos solos pouco intemperizados é monomodal (a) e a curva característica representativa dos solos profundamente intemperizados é bimodal (b). A curva característica bimodal é marcada por duas entradas de ar, uma nos macroporos e outra nos microporos, que maioritariamente integram os agregados.

Considerando-se a possibilidade de analisar-se a estrutura de um solo utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Curva Característica, esse artigo recorrerá a algumas técnicas para definir a estrutura ao longo de um perfil de solo intemperizado do Distrito Federal. As análises



(a)



(b)

Fig. 2 – Parâmetros da Curva Característica: (a) Monomodal (Gitirana Junior *et al.*, 2015); (b) Bimodal (Feuerharmel *et al.*, 2005).

semiquantitativas, de modo estimativo, das imagens obtidas do MEV foram realizadas utilizando-se o programa Imagej com livre acesso na internet. Esse programa permite observar as áreas e magnitudes de determinadas componentes de uma imagem.

O presente estudo se volta para a análise estrutural e de curvas características obtidas para um perfil de intemperismo tropical sendo analisadas amostras coletadas a 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m e 12 m de profundidade.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Solos Estudados

O local onde foram coletadas as amostras para os ensaios deste estudo é o Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, que se situa no Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte – Brasília – Distrito Federal. A posição geográfica é determinada pelas coordenadas 15°45'56'' de latitude sul e 47°52'20'' de longitude oeste. O local representa o perfil típico da camada porosa de Brasília e é um solo residual do domínio da unidade ardósia do grupo Paranoá.

Foram coletadas amostras indeformadas para se evitar variações das características estruturais e mineralógicas do solo procedentes da manipulação e amostras deformadas que foram utilizadas nos ensaios de caracterização física e compactação. Para a coleta das amostras realizou-se um poço com 12 m de profundidade e 1,2 m de diâmetro, escavado de acordo com a norma ABNT NBR 9604 (2016).

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas profundidades descritas no Quadro 1. As amostras indeformadas, tomadas de forma cúbica com dimensões de aproximadamente 30x30x30 cm, foram parafinadas e guardadas em câmara úmida em condições de temperatura estáveis. As amostras deformadas, cerca de 200 kg por profundidade, foram acondicionadas em sacos plásticos objetivando manter ao máximo a umidade natural.

Quadro 1 – Relação das Amostras Utilizadas (Rodrigues, 2017)

Tipo	Profundidade (m)	Classificação Tátil Visual
Deformada e Indeformada	(1,7 a 2,0)	Areia argilosa vermelha
	(3,7 a 4,0)	Areia argilosa vermelha
	(5,7 a 6,0)	Argila arenosa vermelha
	(7,7 a 8,0)	Argila arenosa vermelha
	(9,7 a 10,0)	Silte variegado
	(11,7 a 12,0)	Silte variegado

Para analisar a estrutura do solo em estudo foram realizados ensaio para definição da caracterização geotécnica, análises utilizando microscopia eletrônica de varredura e curvas características utilizando placa de sucção, ensaio papel filtro e WP4C.

2.2 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O termo análise microscópica dos solos refere-se à caracterização da microestrutura do material, no que diz respeito à composição, quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases, podendo a análise envolver todas ou apenas parte dessas características.

A principal função de qualquer microscópio é tornar visível o que excede o limite de resolução a olho nu (0,2 mm). A forma mais antiga e usual de observação é por meio da lupa seguida do microscópio óptico, que ilumina o objeto com luz visível ou luz ultravioleta. Os microscópios

ópticos convencionais estão geralmente limitados a um aumento máximo de 2.000 vezes, porque acima deste valor, detalhes menores se tornam imperceptíveis (Dedavid *et al.*, 2007).

A microscopia eletrônica de varredura se apresenta como uma técnica mais adequada ao estudo da microestrutura dos solos, pois ela permite ampliações que podem superar 300.000 vezes, a depender do equipamento (Maliska, 2005).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) possibilita a observação e análise da superfície de amostras espessas através de imagens tridimensionais, associadas à alta resolução que pode alcançar valor melhor do que 1nm e à elevada profundidade de foco.

No uso do MEV convencional há necessidade de baixa pressão (alto vácuo) e as amostras de materiais que não são bons condutores, como é o caso do solo, sofrem acúmulo de cargas, gerando campos elétricos intensos deteriorando a qualidade das imagens formadas. Uma solução para superar essa dificuldade é cobrir toda superfície da amostra com uma delgada camada de material condutor (ouro, platina, carbono ou alumínio), processo chamado de metalização (Hinrichs e Vasconcelos, 2014).

Além do MEV convencional que opera a alto vácuo, existe o MEV de baixo vácuo (ou de pressão variável), que é útil em casos em que a metalização não é conveniente. O MEV de baixo vácuo pode ser operado na condição de alto vácuo como um MEV convencional.

Na análise foi utilizado um MEV da marca Tescan, modelo VEGA 3, com filamento padrão de tungstênio, de vácuo variável (alto e baixo) e com sistema duplo de EDS da Oxford (Figura 3a). Na metalização foi utilizado um equipamento da marca Quorum, modelo Q150R ES (Figura 3b).

Neste estudo, devido à menor interferência na estrutura do solo, optou-se pelo uso de baixo vácuo sem metalização das amostras, sendo o uso da técnica de alto vácuo com metalização das amostras realizado apenas para efeito de comparação e análise do impacto desta técnica na microestrutura do solo. Nessa análise comparativa foi utilizada apenas a amostra coletada a 2 m de profundidade.

Foram realizadas análises no MEV em amostras naturais indeformadas. Estas amostras naturais foram retiradas de blocos indeformados coletados do perfil de solo nas profundidades indicadas no Quadro 1. A obtenção da superfície de observação foi feita por meio de esfoliações e faturamento da amostra em pequenos fragmentos, sem causar perturbação na superfície de observação.



(a)



(b)

Fig. 3 – (a) Microscópio eletrônico de varredura; (b) Metalizador.

As amostras, sem passar por nenhum processo de secagem, foram mantidas dentro de um dessecador para preservar a sua umidade, e em seguida, foram analisadas com o microscópio eletrônico de varredura operando a baixo vácuo.

Para analisar as amostras com o MEV, operando em alto vácuo, foi necessário realizar o processo de metalização das amostras. O procedimento utilizado consistiu em secar a amostra ao ar, depois fixá-la em um porta-amostra de alumínio, usando emulsão de prata, fazendo a interligação da superfície da amostra com o porta-amostra, com a finalidade de assegurar boa condutividade elétrica entre eles. Posteriormente, essa amostra foi levada ao processo de metalização por aproximadamente 60 segundos, onde se revestiu a superfície da amostra com uma fina camada (20 – 30 nm) de ouro, a fim de tornar essa superfície condutora (Figura 4a).

O porta-amostra contendo solo analisado foi colocado na câmara de amostras do MEV (Figura 4b). No modo de operação a baixo vácuo, foi mantida na câmara de amostras a pressão 5 Pa. Nas análises em alto vácuo as amostras, depois de terem passado pelo processo de metalização, foram submetidas para análise a pressão de vácuo 10^{-3} Pa. Destaca-se, no entanto, que a própria desidratação da amostra para metalização a conduz a valores muito mais elevados de sucção.

O porta-amostra é fixo em um suporte que se movimentava de acordo com a intenção do operador em capturar imagens de diferentes partes da amostra.

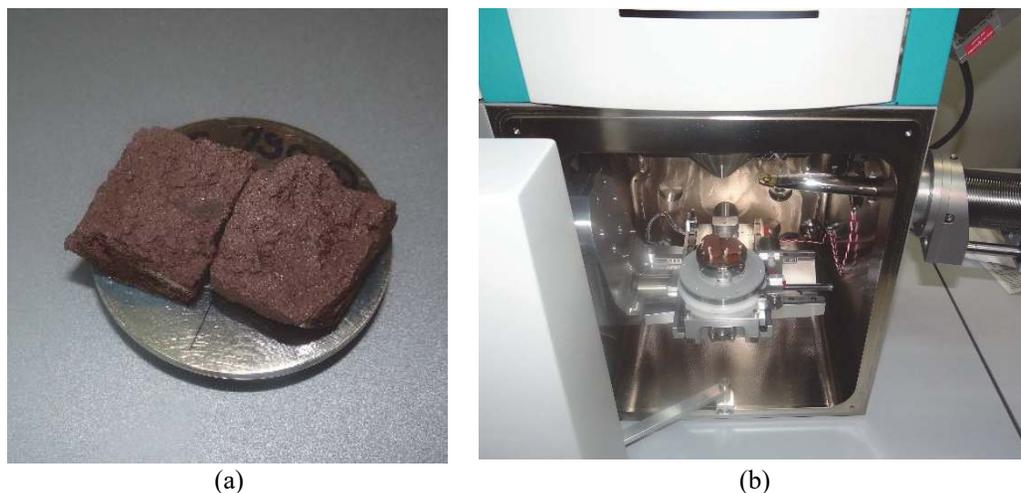


Fig. 4 – (a) Amostra após metalização; (b) Câmara de amostra.

2.3 – Curva Característica

Segundo Queiroz (2015) é necessário a combinação de mais de um método de ensaio laboratorial para abranger toda a variação de sucção dos solos do Distrito Federal, visto que esses tipos de solos apresentam curvas bimodais variando a sucção entre 1 kPa a 100000 kPa.

Para construção da curva característica completa do solo tropical do Campo Experimental da UnB foram utilizadas três técnicas: Placa de Sucção, Ensaio Papel Filtro e WP4C.

2.3.1 – Procedimento Experimental da Placa de Sucção

A técnica da placa de sucção consiste em colocar uma amostra em uma placa porosa, saturada, cujo valor de entrada de ar é superior à sucção que se deseja medir. Uma diferença de pressão é estabelecida na placa, aplicando diretamente uma sucção à parte inferior do sistema, enquanto a parte superior se mantém na pressão atmosférica. Após o tempo necessário para atingir o equilíbrio

hidráulico, retira-se a amostra e determina-se a umidade. Nessa técnica determina-se apenas a sucção matricial do solo, pois a placa é permeável aos íons dissolvidos na água (Queiroz, 2015).

A parte inicial da curva característica, correspondente aos menores valores de sucção, foi determinada utilizando o método da placa de sucção. Os ensaios foram realizados utilizando o equipamento desenvolvido por Otálvaro (2013), Figura 5.

Segundo Otálvaro (2013) o equipamento é composto por três sistemas principais: i) uma célula de aço inox constituída por três peças: base, anel porta amostra e anel superior. A base conta com uma entrada e uma saída para a água deionizada, e um fundo rebaixado em forma de espiral para facilitar a saturação da pedra porosa de 100 kPa de entrada de ar, e o anel superior é provido de uma tampa acrílica perfurada; ii) o sistema de saturação é constituído por um reservatório de cinco litros e uma superfície que garanta uma diferença de nível de 1,5 m em relação ao reservatório; e iii) um sistema de imposição de sucção, composto por uma prateleira colocada a 2,3 m do nível do piso do laboratório, um tubo guia para deslocar verticalmente a bureta provendo uma diferença de nível de 1,7 m, e uma bureta de 50 mL graduada.

A placa de sucção foi utilizada para valores de sucção menores ou iguais a 16 kPa. O princípio de funcionamento consiste na aplicação direta de uma carga hidráulica negativa na amostra, mantendo a pressão de ar sob condições atmosféricas. A carga hidráulica negativa é limitada a 100 kPa devido à possibilidade de cavitação dentro do tubo de drenagem (Otálvaro, 2013).

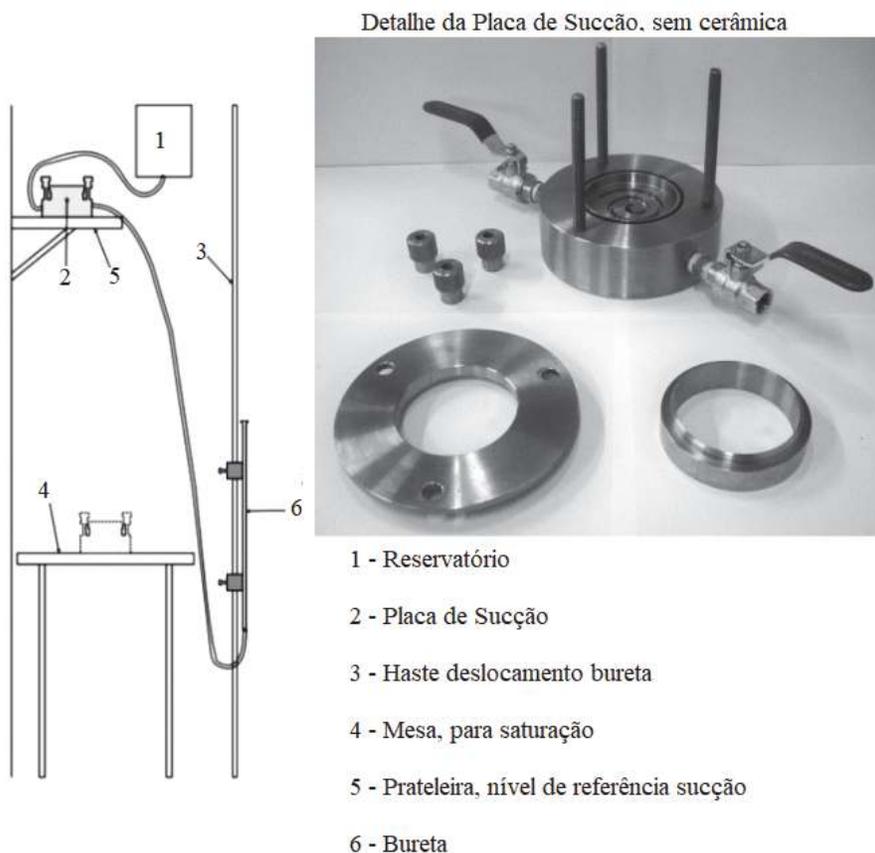


Fig. 5 – Placa de Sucção Laboratório de Geotecnia da UnB (Otálvaro, 2013).

O ensaio é executado em duas etapas: Na primeira etapa a placa é colocada no nível da bancada e a água circula entre o reservatório e a placa, saturando-a. Em seguida os registros da placa são fechados, coloca-se papel filtro por cima da pedra porosa, para evitar contato da pedra com a amostra, insere a amostra de solo moldado, encaixando-se o anel cilíndrico de aço na placa, e usa um recipiente plástico por cima da placa, para evitar a evaporação de água. Na segunda etapa a placa é içada ao nível da prateleira, abre-se registro da bureta e posiciona-se o menisco no nível da placa. Aguarda-se estabilizar a leitura e corrige-se a posição do menisco. A partir daí posiciona-se inicialmente o menisco a 10 cm abaixo do nível da placa, o que corresponde à sucção aplicada de 1 kPa. Anota-se o volume que entra na bureta em intervalos de tempo crescentes até a estabilização. Repete-se o procedimento para cada patamar de sucção desejado.

A aplicação de sucção nas amostras em que foram realizados os ensaios com a placa de sucção se deu para variações de 2 kPa entre estágios. As mudanças de sucção foram efetuadas após o término do fluxo de água em cada estágio. O término da aplicação de sucção em cada estágio se deu quando do aparecimento de bolhas de ar no sistema placa-bureta.

2.3.2 – Procedimento Experimental do WP4C

O ensaio para obtenção dos valores de sucção utilizando o equipamento WP4C consiste nos seguintes procedimentos:

Primeiro Passo: utiliza-se um anel de metal com as dimensões de 38 mm x 6 mm e um estilete para moldagem da amostra a ser colocada na cápsula do equipamento. Deve-se então escolher a cápsula para o armazenamento da amostra. O WP4C possui dois tipos de cápsula: as de plástico descartável e aço inoxidável. As cápsulas descartáveis de plástico são adequadas para a maioria das amostras, mas não são boas quando se trata de amostras úmidas. Para medir amostras com potencial de água mais úmido do que -1 MPa, deve-se utilizar as de aço inoxidável. Nessa pesquisa foram utilizadas cápsulas de aço. As cápsulas antes de serem utilizadas foram limpas com água deionizada para evitar que os solutos contaminem amostras subsequentes causando potencial osmótico artificialmente negativo. Retira-se a amostra do anel de metal com o auxílio de um extrator.

Segundo Passo: em seguida pesa-se a cápsula de aço sem a amostra para cálculo do teor de umidade. Nesta pesagem foi utilizado uma balança com precisão de 0,001g. Coloca-se a amostra na cápsula, tomando-se o cuidado para que a amostra possua metade da altura da cápsula, pois quando muito cheias podem contaminar os sensores na câmara. Outro aspecto importante que deve ser ressaltado foi o cuidado para que a amostra cobrisse completamente o fundo da cápsula, pois o WP4C não é capaz de medir com precisão uma amostra que não cobre o fundo da cápsula gerando-se erros então na realização do ensaio. Quando se tem uma área de superfície de amostra maior acelera a leitura encurtando o tempo necessário para alcançar o equilíbrio de vapor e aumentando a precisão do instrumento fornecendo medições de temperatura de amostra mais estáveis. Pesa a cápsula com amostra para o cálculo do teor de umidade. O equipamento deve ser ligado e esperar cerca de 20 minutos para realização da primeira leitura, então foi tomado o cuidado de tampar a amostra para evitar que a mesma tivesse alguma interferência da umidade do ambiente. Abre-se a “gaveta” do equipamento e coloca a amostra preparada na gaveta.

Terceiro Passo: ao colocar a amostra na câmara do equipamento foi averiguado a temperatura da amostra pressionando o botão direito do equipamento. Se a amostra estiver mais quente do que a câmara ($T_s - T_b$ um número positivo), o equipamento não efetuará a leitura e a amostra deve ser retirada imediatamente, deixando-a esfriar em uma superfície fria com a tampa. Não se deve esfriar muito a amostra, ou o tempo de equilíbrio será alongado ao retornar ao equipamento. O tempo para resfriamento deve ser por volta de um minuto, retomando o procedimento e observando a diferença de temperatura (idealmente $T_s - T_b$ entre -0,5 e 0), pois entre esse intervalo as leituras realizadas pelo equipamento são mais rápidas. Deve-se girar o botão da gaveta da amostra para a posição READ para selar a cápsula da amostra com a câmara e então inicia-se a primeira leitura da amostra.

No final da leitura o equipamento emitirá um bip e a luz verde ficará piscando. O instrumento apresentará em seu display a sucção em MPa, a função logarítmica na base 10 da sucção e a temperatura da amostra. Então abre a gaveta da amostra e a pese novamente a amostra para determinação da sua umidade. A Figura 6 ilustra os passos descritos.

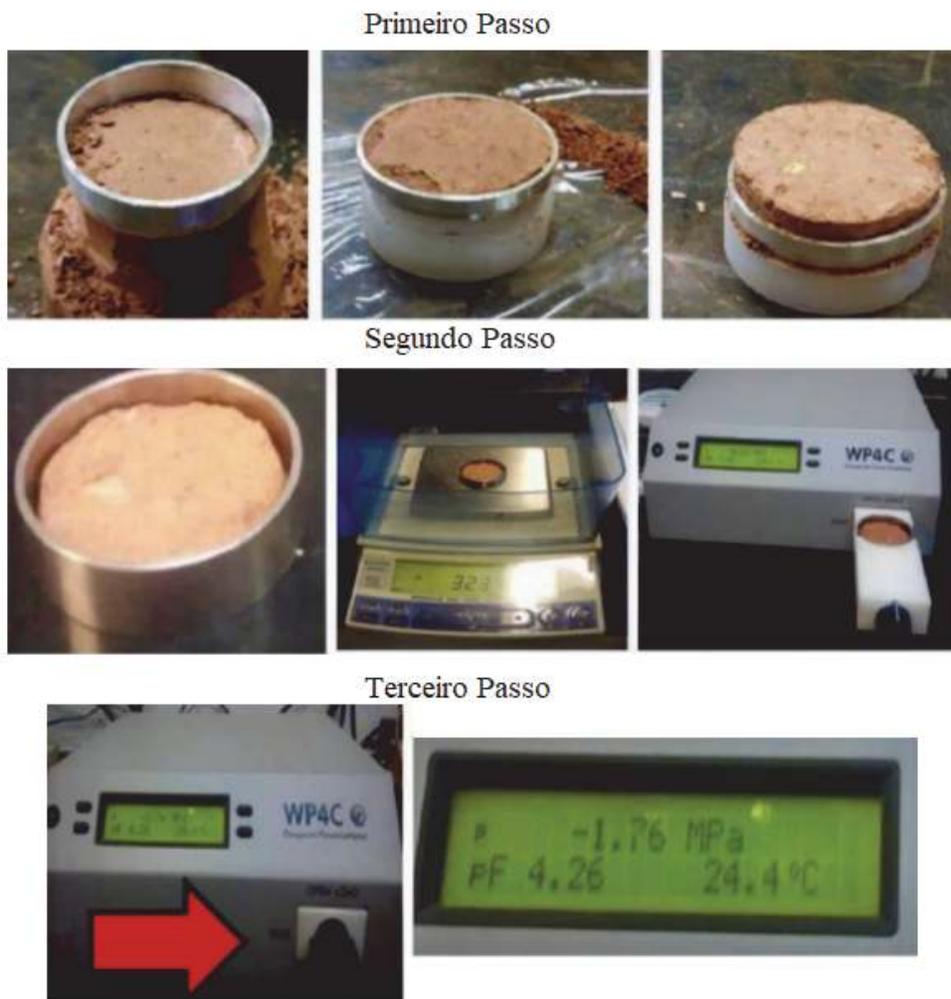


Fig. 6 – Procedimento Experimental com equipamento WP4C.

Para efetuar as próximas leituras, é necessário deixar a amostra em repouso durante o tempo de 5 a 20 minutos para depois realizar novamente uma nova leitura. O procedimento a ser utilizado no WP4C é o de leituras no modo preciso. As explicações sobre qual modo de leitura a se utilizar estão descritas no Decagon Devices (2013). Para se avaliar a eficácia do equipamento serão utilizadas amostras indeformadas, tendo-se o cuidado de preencher toda a base do molde.

O equipamento foi bastante eficiente, simples e ágil na determinação das curvas características das amostras, levando em torno de dois dias para a determinação das curvas características de cada amostra. Quando se deixa uma amostra de um dia para o outro deve-se fechar o recipiente com uma tampa apropriada da cápsula e envolvê-la com plástico filme para evitar possível perda de umidade do material.

O alcance de medições de sucção com WP4C vai de 0 a 300000 kPa, onde de 0 a 10000 kPa tem-se leituras com baixa precisão, sendo recomendável usá-lo apenas acima de 100 kPa para obtenção da sucção total. Portanto, para obtenção da curva característica foi utilizado o equipamento como forma de complementação a outras metodologias, lembrando que não se consegue obter uma curva característica inteira usando somente um equipamento.

As amostras iniciaram com as seguintes umidades: para profundidade de 2 m ($w = 6,9\%$), 4 m ($w = 18,7\%$), 6 m ($w = 20,6\%$), 8 m ($w = 15,9\%$), 10 m ($w = 8,4\%$), 12 m ($w = 9,0\%$).

2.3.3 – Procedimento Experimental do Ensaio Papel Filtro

A determinação da curva característica pelo método do papel filtro foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Marinho (1995).

A técnica consiste na utilização de papéis filtro (do tipo quantitativo) como instrumento de medida para a quantificação indireta da sucção matricial e/ou total do solo.

A metodologia do papel filtro baseia-se na colocação do solo, com determinado teor de umidade, em contato com um material poroso ou próximo deste (i.e., papel filtro), com uma umidade menor, que possua a capacidade de absorver água. O contato ou a proximidade faz com que o papel filtro absorva água do solo (seja por efeitos de capilaridade – sucção matricial ou por fluxo de vapor – sucção total) até que o equilíbrio de energia livre da água entre o solo e o papel seja alcançado. A sucção do solo é obtida a partir da umidade do papel filtro e da sua curva de calibração. Quando o equilíbrio é alcançado, os materiais, solo e papel, atingem um mesmo valor de sucção, porém, com umidades geralmente diferentes (Marinho, 1995).

Para a medição da sucção matricial, o papel filtro é colocado diretamente sobre a superfície da amostra, com objetivo de entrar em contato direto com a água presente nos poros do solo. No presente estudo a medição da sucção matricial foi efetuada colocando-se três papéis filtros sobrepostos em contato com o corpo de prova, sendo, um em contato com o solo para proteger o papel do meio contra contaminação e um externo para permitir melhor equilíbrio da umidade e, portanto, da sucção no papel do meio.

Para a medição da sucção total, foi colocado um espaçador de PVC de 8 mm entre a amostra e o papel filtro, garantindo a troca de umidade entre o solo e o papel filtro apenas por fluxo de vapor, sem permitir o contato da água presente nos poros do solo com o papel. Nesse caso o papel para controle da sucção foi colocado diretamente em contato com o espaçador.

Montado o ensaio envolveu-se as amostras com duas camadas de filme plástico e depois mais duas camadas de papel alumínio, posteriormente identificadas e colocadas em uma caixa de isopor, que permaneceu lacrada por 15 dias, tempo admitido como suficiente para que se atingisse o equilíbrio de sucção entre o papel filtro e o solo.

Com as umidades dos papéis filtro (w_p) e as curvas de calibração, obteve-se as sucções dos corpos de prova, utilizando as equações seguintes, propostas por Chandler *et al.* (1992):

$$Sucção (kPa) = 10^{(6,05 - 2,48 * \log w_p)} \quad (1)$$

para umidade do papel filtro maior que 47% e:

$$Sucção (kPa) = 10^{(4,84 - 0,0622 * \log w_p)} \quad (2)$$

para umidade do papel filtro menor ou igual a 47%.

Para a determinação da curva característica pela técnica do papel filtro, utilizou-se o método da trajetória mista, tal método consiste na adição de água nos corpos de prova por gotejamento em alguns pontos da curva, naqueles com umidade alvo acima da umidade natural do bloco da amostra e outros pontos deixando-se secar ao ar os corpos de prova para umidades alvos menores que a

natural. Adotando este procedimento foram determinadas as sucções matriciais e total. O papel filtro utilizado para todas as amostras foi o Whatman N° 42.

2.3.4 – Ajuste das Curvas Características

Para a realização da análise da modelagem das curvas características considerando-se a interferência das particularidades microestruturais dos solos, como já pontuado, foram utilizados os resultados obtidos pelas técnicas da placa de sucção, ensaio papel filtro e WP4C.

Considerou-se nestes ensaios que a placa de sucção avalia poros de maior dimensão, o papel filtro cobre a zona de poros que vem a seguir até atingir a zona de microporos e partir daí passou-se a considerar os resultados oriundo do WP4C, destacando-se que existe nos extremos zonas de sobreposição entre estas técnicas de ensaio.

Considera-se que nessas análises a zona de microporos, principalmente quando estes integram agregados nos solos profundamente intemperizados, é crítica, pois, se por um lado o papel filtro muitas vezes não consegue captar a sucção de microporos presentes em certos agregados, devido à falta de continuidade do filme de água no solo, por outro, o WP4C, por medir a sucção total, engloba nos resultados a sucção osmótica.

O erro dessa consideração dos resultados do WP4C como medida da sucção mátrica será tanto maior quanto mais significativa for a sucção osmótica e menor for a sucção mátrica. Para os solos estudados, como se verá, as diferenças não foram tão significativas.

Para a representação matemática dos dados experimentais das curvas características foi utilizada a proposta de Durner (1994):

$$w = \frac{w_M}{[1 + (a_M * \Psi)^{n_M}]^{1-1/n_M}} + \frac{w_m}{[1 + (a_m * \Psi)^{n_m}]^{1-1/n_m}} \quad (3)$$

onde os índices M e m são utilizados para diferenciarem respectivamente a macro e a microestrutura; a e n são parâmetros de ajustes respectivamente relacionados ao valor de entrada de ar e à distribuição do tamanho dos poros; w_M e w_m são parâmetros relacionados à umidade que fica retida nos macroporos e nos microporos retirados da curva característica; Ψ é a sucção; w é o teor de umidade em peso. Os parâmetros de ajustes são definidos por tentativas.

Segundo Grau (2014) a equação bimodal de Durner (1994) geralmente consegue descrever de maneira adequada as curvas características do solo de Brasília, justamente por considerar a presença de dois diâmetros de poros dominantes.

2.3.5 – Programa ImageJ

As imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), foram analisadas qualitativamente no aspecto macro e semiquantitativamente, de modo estimativo, no aspecto micro. As análises qualitativas definidas como componente macro da estrutura do solo servem para avaliações da distribuição de poros, observação da conectividade entre eles e entre os grãos, análise textural e de homogeneidade entre outros fatores estimáveis visualmente.

O programa Imagej trabalha com diferentes tipos de imagens importadas para o programa, que podem ser modificadas para 8 byte, 16 byte, 32 byte, RGB-cor e diferentes frequências de cor e canais, além de permitir a separação de imagens coloridas, para as quais se estabelecem ramos dos tons que são objeto de estudo e seleção. É possível após a seleção dos objetivos, neste caso os poros, realizar a contagem e medição dos mesmos. Seria possível ainda realizar a contagem das partículas, mas pela condição agregada presente nos solos tropicais profundamente intemperizados e a ocorrência de partículas sobrepostas e em pacotes nos solos tropicais pouco intemperizados, a aplicação do programa perderia, no caso, em exatidão (Lopera, 2016).

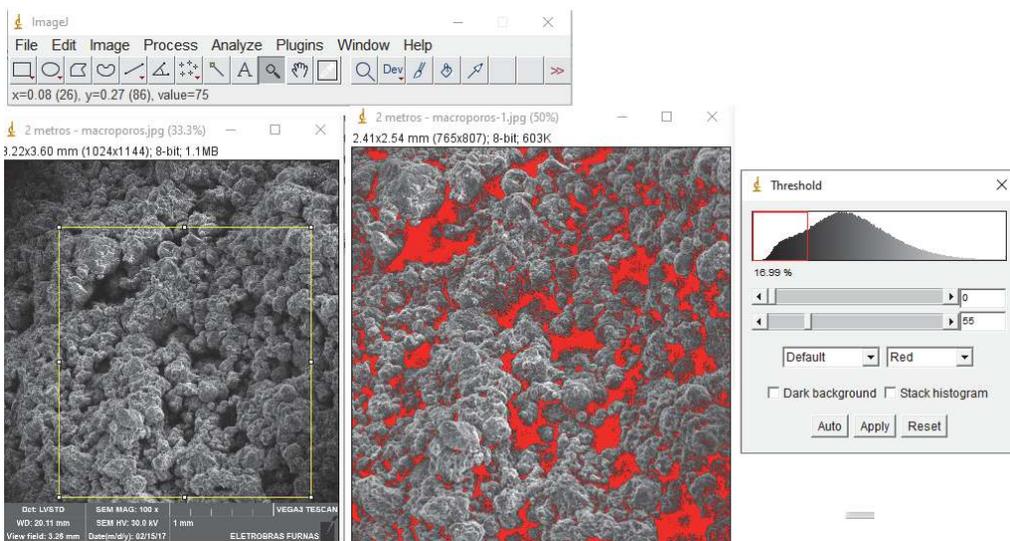


Fig. 7 – Análises semiquantitativas no software Imagej das imagens obtidas no MEV.

As análises semiquantitativas foram realizadas utilizando-se o programa Imagej com livre acesso na internet. Esse programa permite observar as áreas e magnitudes de determinadas componentes de uma imagem. No presente estudo observaram-se as áreas de vazios, distinguidas pela cor preta e ausência de brilho, característica que se faz presente nos minerais, que no programa estão identificadas pela cor vermelha. A Figura 7 exemplifica como foi realizada as análises das imagens.

Posteriormente às análises realizadas da quantidade de poros, assim como de seus tamanhos, realizou-se uma seleção da porosidade total a qual foi analisada obtendo-se a quantidade de poros e suas magnitudes.

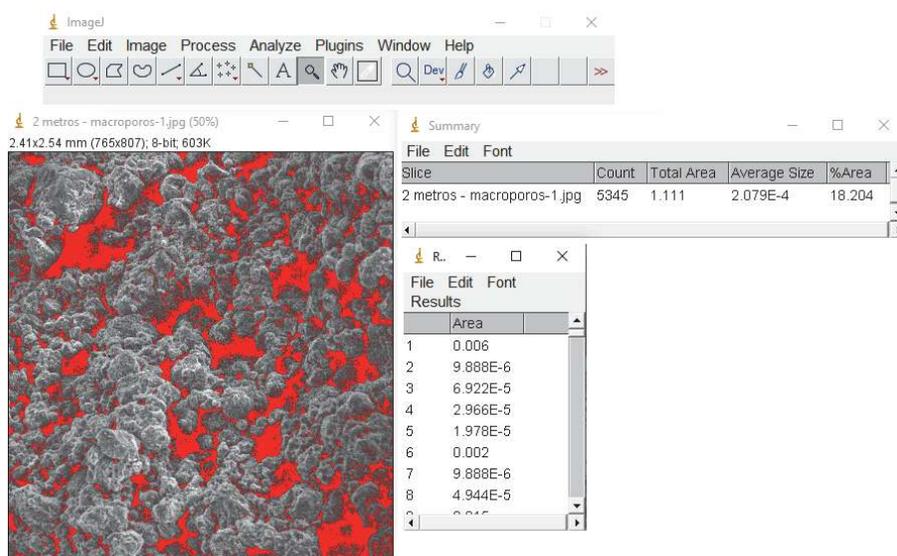


Fig. 8 – Processo de Medição dos Poros.

Então tem-se a relação entre a área de poros (A_p) e a área total das imagens (A_t), sendo possível estimar a relação da porosidade (A_p/A_t) por meio dessas análises semiquantitativas e confirmar a avaliação qualitativa das imagens indicando menor porosidade para o solo saprolítico. A precisão da medição depende da qualidade da imagem e da capacidade do programa, devendo-se salientar ainda que a visualização da imagem não é 3D e, portanto, não dá valores exatos em relação à porosidade determinadas no Quadro 1, e sim são valores estimados (Figura 8).

A precisão da medição depende da qualidade da imagem e da capacidade do programa, devendo-se salientar ainda que a visualização da imagem não é 3D e, portanto, não dá valores exatos em relação à porosidade, e sim são valores estimados (Lopera, 2016).

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 – Caracterização Geotécnica do Solo

A caracterização geotécnica foi realizada de acordo com os procedimentos das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos para as amostras estudadas.

Quadro 2 – Características Geotécnicas ao longo do perfil de solo estudado.

Profundidade (m)	γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	w (%)	e	n (%)	Sr _o (%)
2	11,98	27,32	13,4	1,587	61,3	23,1
4	15,12	27,10	24,2	1,227	55,1	53,4
6	15,61	27,24	24,4	1,171	53,9	56,8
8	15,79	27,07	19,3	1,045	51,1	50,0
10	15,98	27,84	11,4	0,941	48,5	33,7
12	16,58	27,78	15,4	0,933	48,3	45,8

Neste Quadro γ é o peso específico natural, γ_s o peso específico dos sólidos, w a umidade natural, e o índice de vazios, n a porosidade e Sr_o o grau de saturação “in situ” no momento da amostragem.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos por Rodrigues (2017), Guimarães (2002) e Lopera (2016) para limites de Atterberg, granulometria com e sem defloculante e mineralogia. Observa-se desses resultados que até a profundidade de 4 m o perfil de solo apresenta elevado teor de gibbsita e baixo teor de caulinita sendo que a partir dessa profundidade o teor de caulinita aumenta e o teor de gibbsita diminui até desaparecer na profundidade de 10 m. A moscovita surge na profundidade de 8 m. As análises granulométricas mostram um elevado teor de agregado até a profundidade de 8 m. Até essa profundidade o teor de argila com defloculante é elevado e superior ao teor de silte que passa a aumentar e ser elevado a partir de 8 m de profundidade. A plasticidade do solo aumenta na zona de transição (8 m e 10 m) diminuído novamente ao adentrar no solo saprolítico (12 m).

A alteração pela ação da água gera lixiviação, hidrólise e alteração de minerais, primeiro os álcalis (Na, K, Ca, Mg, Ti, etc.) posteriormente Al, Fe e Si de acordo a fragilidade que apresentam. Destas alterações geram-se diferentes concentrações de minerais, primários e secundários, argilominerais, óxidos e hidróxidos. Na Figura 9 obteve para a mineralogia do perfil de solo estudado até a profundidade de 12 m.

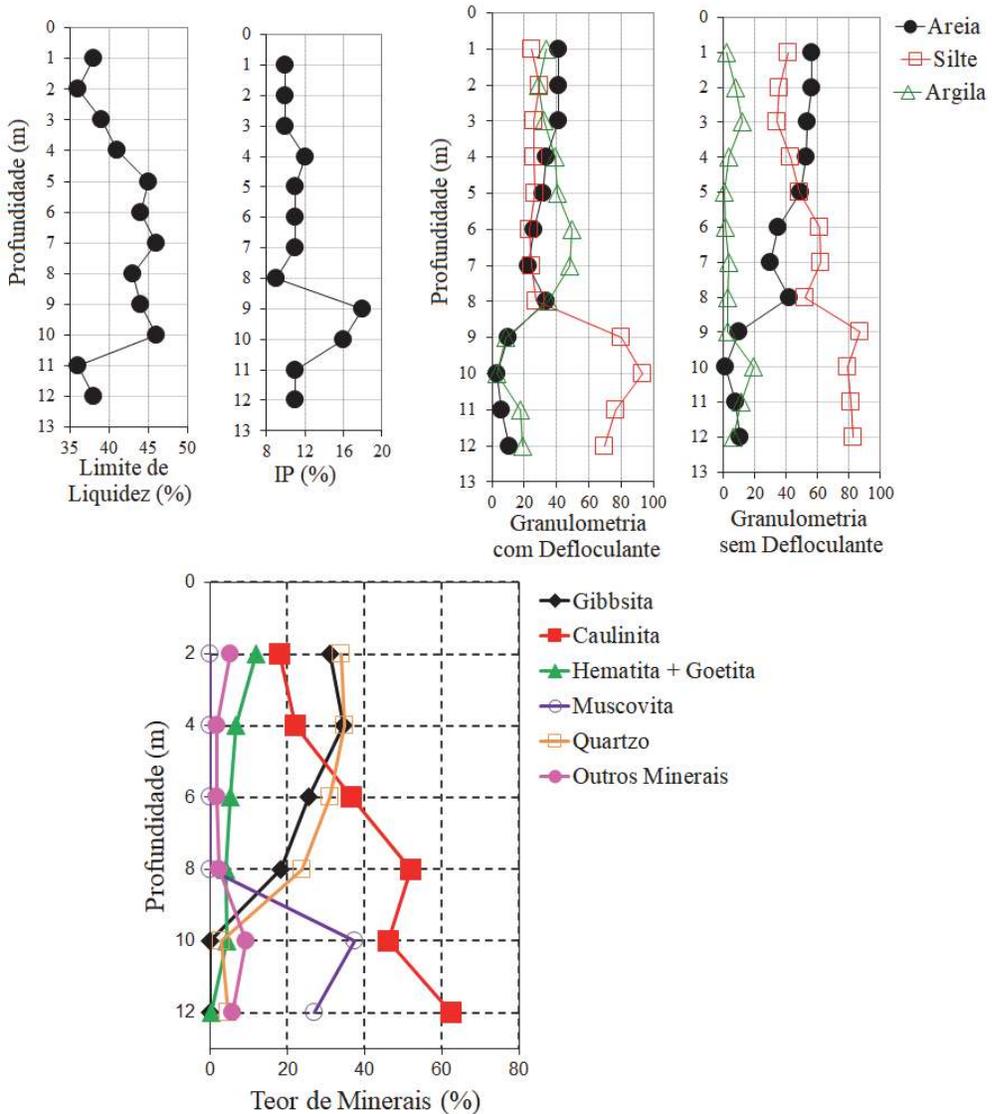


Fig. 9 – Caracterização física e mineralógica do solo do Campo Experimental de Geotecnia da UnB.

3.2 – Análise Estrutural do Perfil de Solo Estudado

Neste item são apresentadas as imagens obtidas com o microscópio eletrônico de varredura do perfil de solo estudado. Por meio dessas imagens, avaliou-se microestrutura desse solo para a condição do solo em seu estado natural e com o modo de operação do microscópio em baixo vácuo.

As análises microestruturais apresentadas nesse item são de grande relevância, pois permitem entender a distribuição de poros no solo ao longo do perfil de intemperismo.

Os resultados das avaliações ópticas tem uma fase qualitativa realizada sobre algumas imagens tomadas com o MEV nas quais as principais variáveis da observação foram os macrocomponentes como a textura, agregação e grãos. Também foram realizadas observações microestruturais onde

foram também empregadas em análises semiquantitativas em que se observou características tanto macro como micro a partir das diferentes ampliações das imagens realizadas.

Podem observar-se nas imagens da Figura 10, a alteração do grau de agregação do solo ao longo do perfil constatando que ele diminui com o aumento da profundidade. A redução da agregação com o aumento da profundidade ao longo do perfil é responsável pela diminuição da macroporosidade e microporosidade, sendo que essa queda da agregação pode estar atrelada à diminuição de gibbsita com o aumento da profundidade no perfil (Figura 10 – Ampliações 100 x).

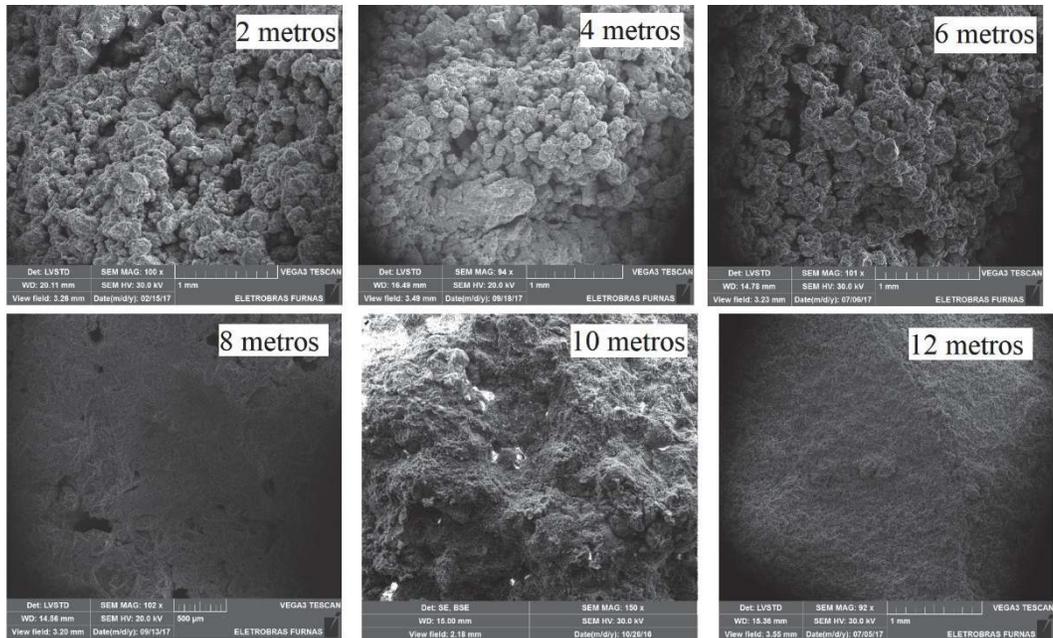


Fig. 10 – Microscopias do Solo Natural.

No estudo qualitativo da composição macro das imagens verificou-se nos solos uma aparência agregada visível. A configuração e distribuição dos vazios são variadas indo de vazios isolados a cadeias de vazios interagregados. Essa aparência do solo vai mudando com o aumento da profundidade passando a ocorrer menos e menores agregados e macroporos. Observa-se na Figura 10 que a variabilidade da distribuição e tamanho dos poros tende a diminuir com o aumento da profundidade. Observa-se também que para as profundidades de 10 e 12 metros, mostra para o solo saprolítico a inexistência de agregações e macroporosidade e uma porosidade com distribuição mais uniforme dos poros.

Na Figura 11a apresenta-se o aspecto geral da amostra de 2 metros de profundidade com ampliação de 100x. Observa-se um solo com uma estrutura predominante de macroporos e as agregações de óxidos-hidróxidos e argila, com boas ligações entre os agregados e alguns caminhos preferenciais de fluxo. Verifica-se também uma certa distribuição espacial homogênea de macroporos com macroporos heterogêneos. A partir da ampliação de 1000 vezes (Figura 11b), observa-se uma estrutura fechada em relação ao agregado, e os microporos internos a essas agregações. Por se tratar de um solo maduro, as partículas de argila não estão preservadas na morfologia original, devido à alteração causada pelo intemperismo.

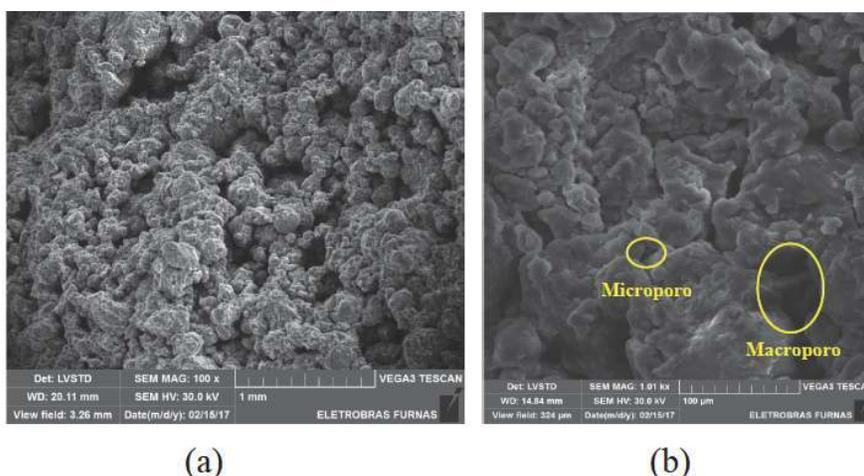


Fig. 11 – Profundidade 2 m: (a) Ampliação 100x; (b) Ampliação 1000x.

As imagens obtidas para a profundidade de 4, 6 m considerando-se aumentos similares a estes estão mostradas na Figura 10, que não existe grandes diferenças macroestruturais entre as amostras ao longo do perfil na zona correspondente ao solo profundamente intemperizado.

A amostra de 8 metros de profundidade representa o horizonte de transição, com características do horizonte superior de solo laterítico juntamente com características da camada inferior de solo saprolítico. Essa amostra quando observada macroscopicamente apresenta regiões com aspectos diferentes, com porções mais e outras menos intemperizadas, pois se trata de uma faixa de profundidade de transição entre solo intemperizado e solo não intemperizado (Figura 12). Na Figura 12a apresenta-se uma imagem obtida na porção característica de solo intemperizado, apresentando distribuição espacial de poros homogênea com tamanhos heterogêneos. A porção da amostra com características de solo pouco intemperizado é representada na Figura 12b. Observa-se macroporos na região mais intemperizada e uma zona menos intemperizada ao centro que possui uma matriz muito mais fechada em relação à Figura 12a.

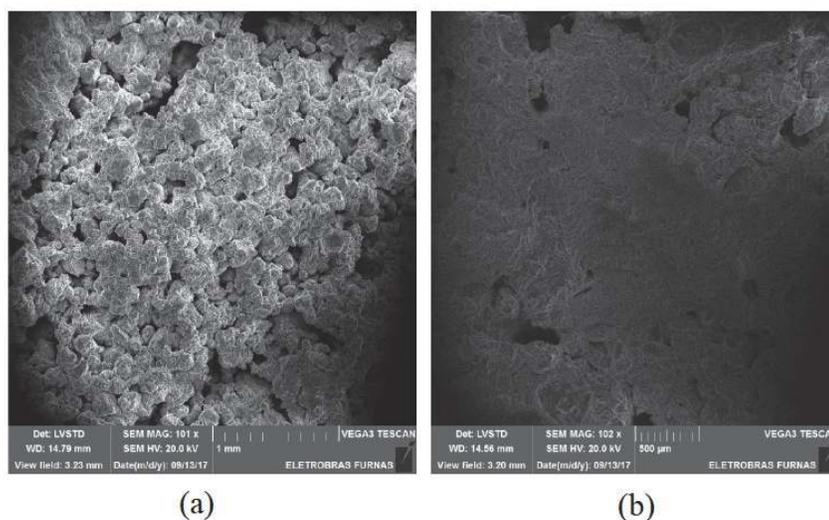


Fig. 12 – Profundidade 8 m com Ampliação 100x: a) Região de Solo Intemperizado. b) Região de Solo Pouco Intemperizado.

As amostras oriundas de 10 m e 12 metros de profundidade correspondem a um solo pouco intemperizado, solo saprolítico. Portanto, na amostra referente à 12 metros, a Figura 13a, ampliação de 100 vezes, apresenta aspecto homogêneo. Com ampliação de 1000 vezes, Figura 13b, a amostra mantém a distribuição homogênea de poros.

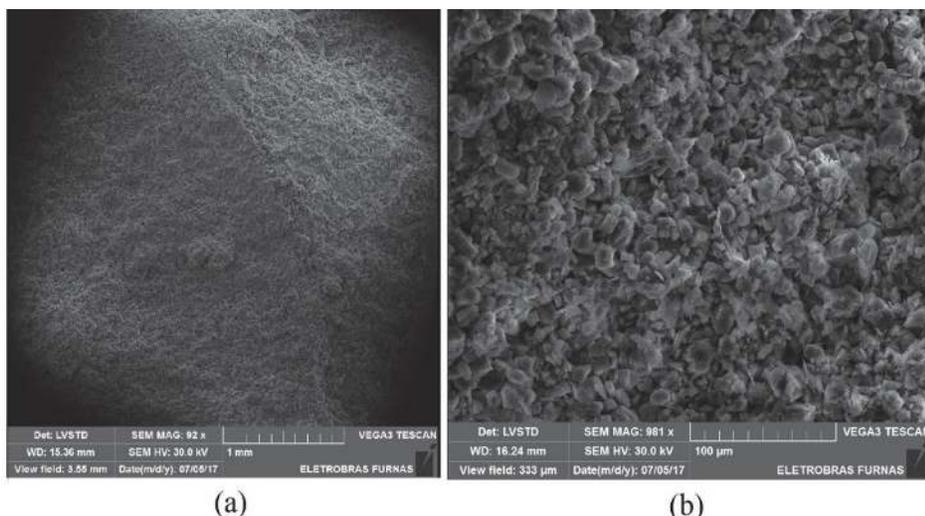


Fig. 13 – Profundidade 12 m: (a) Ampliação 100x; (b) Ampliação de 1000x.

Fazendo-se a análise dessas imagens por meio do Programa ImageJ foi possível fazer uma avaliação semiquantitativa dos poros presentes no solo ao longo do perfil. Considerando-se a ideia de que nas pequenas ampliações (aproximadamente 100 vezes) pode-se observar predominantemente a macroporosidade e que nas ampliações maiores (aproximadamente 1000 vezes) pode-se observar a microporosidade, verifica-se que as relações de poros conforme as análises macro o micro determinadas segundo os aumentos indicados, apresentam valores distintos. Assim, nas ampliações macro de 100 vezes observa-se valores mais elevados que nas maiores ampliações para a relação entre a área de poros e a área total da imagem. Essa constatação é observada ao longo de todo o perfil, mas à medida que se tem menor alteração e agregação, os valores de relação de áreas vão se uniformizando devido a redução do teor de agregados e consequente macroporosidade entre eles.

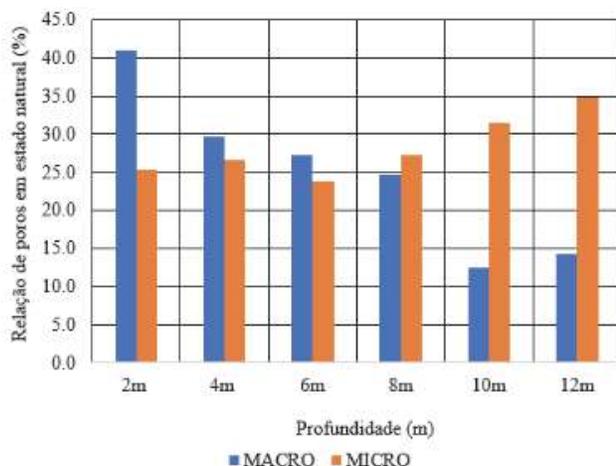


Fig. 14 – Distribuição de Poros do Solo em Estudo.

Quadro 3 – Avaliação quantitativa em porcentagem da porosidade no perfil de solo natural por meio de imagens obtidas no MEV.

Profundidade / Aumento	Área de Poros Ap (μm^2)	Área de Poros Ap (mm^2)	Área Total da Imagem At (mm^2)	Relação de Porosidade (%)
2m / 100x	403621,42	0,40362142	0,9835	41,0
2m / 5000x	230,36	0,00023036	0,00091	25,3
4m / 100x	355360,23	0,35536023	1,1985	29,7
4m / 5000x	159,87	0,00015987	0,0006	26,6
6m / 100x	269043,98	0,26904398	0,9872	27,2
6m / 5000x	90,2591	0,00090259	0,000378	23,9
8m / 100 x	189912,62	0,189912620	0,7721	24,6
8m / 5000x	120,3	0,000120300	0,00044	27,3
10m / 150x	151029,91	0,151029910	1,209	12,5
10m / 5000x	90,932	0,00090932	0,00029	31,4
12m / 100x	122039,87	0,122039870	0,8512	14,3
12m / 5000x	101,11	0,000101110	0,00029	34,9

Na ampliação 1.000 vezes observa-se a tendência a resultados de áreas de poros similares. Estas porosidades visíveis nestas ampliações poderiam ser consideradas como áreas de microporos, ou seja, áreas de poros menores que os poros macro.

O Quadro 3 apresenta a avaliação quantitativa da porosidade no perfil de solo estudado. O comportamento de variação da porosidade é observado melhor na Figura 14.

3.3 – Curvas Características

Antes de iniciar as análises relacionadas ao uso do modelo de Durner (1994) são destacados aspectos particulares do perfil de solo estudado, para mostrar a importância do tratamento diferenciado para solos com distribuição não homogênea dos poros, ou seja, para solos com porosidade não uniforme e sem continuidade na graduação dos poros.

A Figura 15 mostra que ao aplicar o modelo de transformação da curva característica ($e \times pf =$ índice de vazios vezes a sucção medida na escala logarítmica) apresentado por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), que adotando-se os índices de vazios globais (V_v/V_s) dos solos obtidos para cada profundidade, não ocorre a sobreposição das curvas características para o manto profundamente intemperizado, em especial na zona correspondente aos microporos (Figura 15a). Já para o solo pouco intemperizado (Figura 15b) ocorre certa sobreposição sendo as diferenças ligadas a fatores como mineralogia e a própria microestrutura do solo. Isso mostra que existe a necessidade de se considerar no caso dos solos profundamente intemperizados os poros segundo a parcela onde está atuando a sucção, ou seja, se nos microporos compondo os agregados ou fora deles.

No modelo bimodal de distribuição de poros como é o caso dos solos analisados na Figura 15a propõe-se que se considere os macroporos como poros existentes interagregados e que de modo predominante os microporos ocupando o interior dos agregados (intraagregado). A Figura 16, mostra como, em princípio, se dá a distribuição de poros ao longo da curva característica. Os macroporos definem um primeiro patamar com grandes variações de umidade e pequenas variações de sucção. Em seguida, existe uma zona de transição, e logo após os microporos. A quantidade e distribuição inclusive quanto ao tamanho dos poros definem a inclinação dessa linha de transição (α), a qual pode ser íngreme, quando da inexistência destes, ou ser suave, quando for significativa a sua presença.

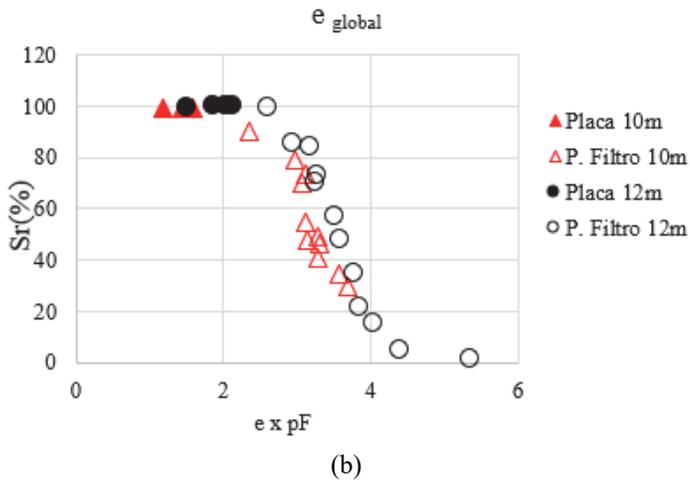
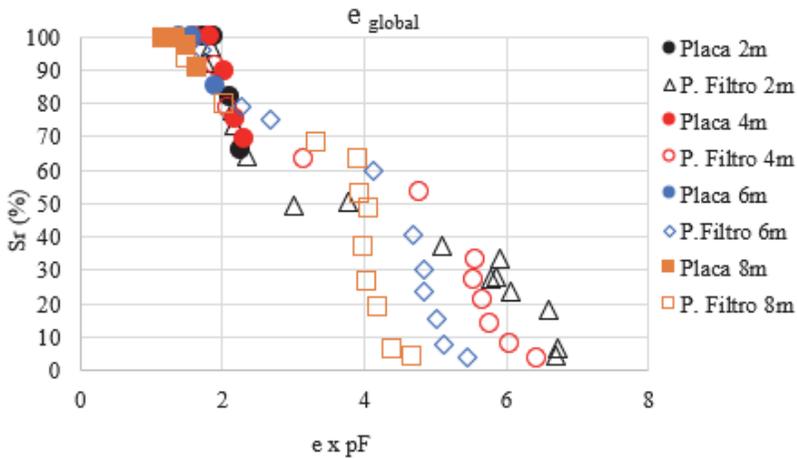


Fig. 15 – Curvas características transformadas: a) solos profundamente intemperizados; b) solos pouco intemperizados.

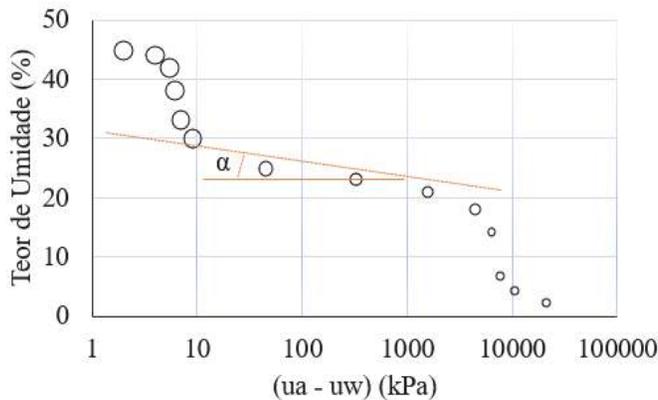


Fig. 16 – Modelo de distribuição de poros em solos tropicais profundamente intemperizados.

Na zona dos microporos cuja amplitude depende do teor destes no solo, e o valor da sucção depende não só do tamanho dos poros, mas também da composição químico-mineralógica do solo. Entretanto, para maiores profundidades no perfil de intemperismo tropical estudado, se fazem presentes os solos menos intemperizados que passam a apresentar uma distribuição de poros uniforme a bem graduada como exemplifica a Figura 15b, e os poros podem de modo contínuo variar entre macro e microporos.

Considerando a ideia desse modelo exposto na Figura 16, a Figura 17 apresenta os resultados obtidos para as profundidades 2 m, 4 m, 6 m e 8 m fazendo-se, no entanto, a transformação das curvas características considerando os índices de vazios correspondentes aos microporos ($e_{\text{micro}} = V_v \text{ micro} / V_s \text{ agregado}$) e aos macroporos ($e_{\text{macro}} = V_v \text{ macro} / V_s'$), onde V_v = volume de vazios correspondente aos micro e macroporos e V_s' = volume de sólidos não agregado mais volume de sólidos aparente.

Os cálculos dos índices de vazios dos microporos foram realizados considerando-se a umidade de entrada de ar nos mesmos como correspondente aos volumes de vazios que eles apresentam e o teor de agregados, este definidor do volume de sólidos. Destaca-se que esse ponto corresponde ao de entrada de ar nos microporos no modelo proposto por Camapum de Carvalho e Leroueil (2014). O e_{macro} foi calculado considerando-se o volume de vazios restante nas amostras em relação aos vazios globais. Neste cálculo considerou-se como volume de sólidos as partículas não agregadas e o volume global dos agregados o que corresponderia a um volume de sólidos aparente, pois neles estão englobados os volumes de vazios que integram os agregados. Camapum de Carvalho *et al.* (2015b) apresentam de modo detalhado os procedimentos de cálculo de e_{micro} e e_{macro} .

Observa-se na Figura 17 que com esse tratamento dado às amostras as curvas características transformadas ($e \times pF$), como esperado para uma mesma distribuição de poros e solos químico-mineralogicamente de mesma fonte, são praticamente coincidentes. Como se verá nas análises que seguem o modelo usado (Durner, 1994) mostra sua boa adaptação a solos marcados por distribuição de poros bimodal como é o caso das amostras estudadas até a profundidade de 8 m.

As curvas características são geralmente plotadas colocando-se a sucção em função da umidade gravimétrica, da umidade volumétrica ou do grau de saturação. No presente artigo se trabalhará nas análises com a umidade gravimétrica.

O formato da curva característica depende do tipo de solo, da porosidade, do histórico de tensões e guarda como visto nas Figuras 15 e 17 por meio das curvas características transformadas relação direta com a distribuição de poros.

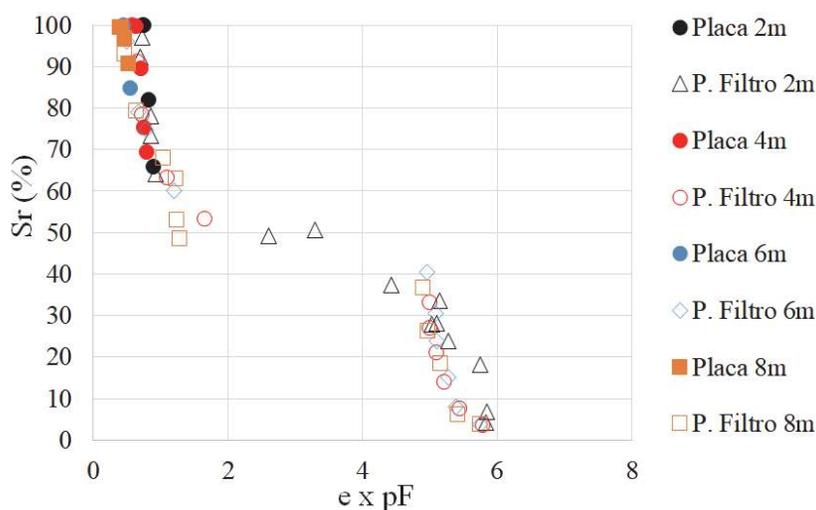


Fig. 17 – Curvas transformadas considerando e_{micro} e e_{macro} .

Como exposto na metodologia foram empregadas no presente estudo três técnicas para a obtenção da curva característica do perfil de solo em estudo. Para sucções até ± 16 kPa utilizou-se a placa de sucção que permitiu um ajuste fino nas baixas pressões negativas aplicadas. Para sucções até ± 50000 kPa utilizou-se a técnica do papel filtro, por ser o máximo de sucção que se conseguiu medir com precisão com essa técnica. Com o WP4C mediu-se sucções entre 1000 kPa e 100000 kPa a depender da amostra de solo analisada.

Antes de iniciar a análise das curvas características obtidas, dadas as especificidades do perfil de solo tropical analisado, cabe a apresentação de alguns entendimentos estabelecidos até o presente para esses solos regionais. Camapum de Carvalho e Leroueil (2004) apresentaram as curvas características dos solos profundamente intemperizados como sendo compostas por uma zona de macroporos e uma zona de microporos e poros intermediários entre elas. Nas curvas características desses solos se tem uma entrada de ar nos macroporos, o que se dá para baixos valores de sucção (geralmente inferior a 10 kPa), e uma entrada de ar nos microporos que compõem os agregados (geralmente superior a 1000 kPa, mas depende da mineralogia e tamanho dos poros). Nos solos menos intemperizados se tem apenas a entrada de ar inicial.

Considerando curvas características de retenção de água onde o eixo correspondente à sucção matricial é colocado em escala logarítmica ou representado em termos do logaritmo da sucção os solos geralmente podem apresentar três formas de curva característica: uma forma em que os poros apresentam distribuição monomodal podendo esta ser caracterizada por poros que vão de uniformes a bem graduados, ou seja, tem uma homogeneidade na distribuição dos poros; uma forma bi, tri ou mais modal, ou seja, com descontinuidades ao longo da curva geradas por importantes variações entre tamanhos de poros indicando um perda de homogeneidade na distribuição, sendo que em cada segmento modal essa curva pode ser mais ou menos horizontalizada a depender do nível de uniformidade ou graduação dos poros e o trecho entre eles será mais ou menos verticalizado a depender dos poros intermediários existentes no solo; uma forma predominantemente curva, ou seja, descaracterizada de trechos aproximadamente lineares na porção intermediária entre a entrada de ar e a sucção residual (Camapum de Carvalho e Leroueil 2004). Esse último tipo de forma de curva é geralmente característico de solos expansivos e de materiais que fluem. A curvatura se deve às variações significativas de porosidade que ocorrem após a entrada de ar sendo que no caso dos solos expansivos ela é imposta pelas variações de distância interplanar basais e no caso das misturas betuminosas devido à fluência do ligante asfáltico presente como elo de ligação entre os grãos.

Partindo-se de observações comuns sobre a distribuição do tamanho dos poros dos solos, pode-se argumentar que duas classes de poros são geralmente distinguíveis. A primeira classe corresponde aos maiores poros (macroporos) e a segunda classe corresponde aos menores poros (microporos). A disponibilidade da água que preenche uma ou outra classe de poros será diferente. Para a primeira classe, as trocas de água são principalmente regidas por efeitos capilares, enquanto que para segunda classe, a água é mais ligada aos sólidos por interações físico-químicas (Alonso *et al.*, 2010).

A Figura 18 mostra as curvas características de sucção mátrica obtidas para as diferentes profundidades. Cabe lembrar que nelas foram inseridos os resultados de sucção total obtidos por meio do WP4C. O formato destas curvas depende do tipo de solo e da distribuição e tamanho dos poros. No caso dos solos profundamente intemperizados, profundidades 2 m, 4 m e 6 m, como grande parte das partículas de argila encontram-se em estado agregado formando grãos de tamanho argila e areia com macroporos entre eles se tem uma significativa variação de umidade ainda para baixos valores de sucção atuantes. Observa-se nessas figuras que essa variação de umidade diminui com o aumento da profundidade no perfil de solo estudado e é quase imperceptível na profundidade 8 m (Silva, 2017).

Segundo Gerscovich (2001), espera-se que o ponto de entrada de ar varie entre 0,2 kPa e 1 kPa em areias grossas, 1 kPa e 3,5 kPa em areias médias, 3,5 kPa e 7,5 kPa em areias finas, 7kPa e 25 kPa em siltes e seja mais de 25 kPa para as argilas. Camapum de Carvalho *et al.* (2017), mostraram que nos solos argilosos essa pressão de entrada de ar guarda relação direta com os limites de liquidez e plasticidade do solo. Para os solos estudados verifica-se que para as profundidades de 2 m, 4 m,

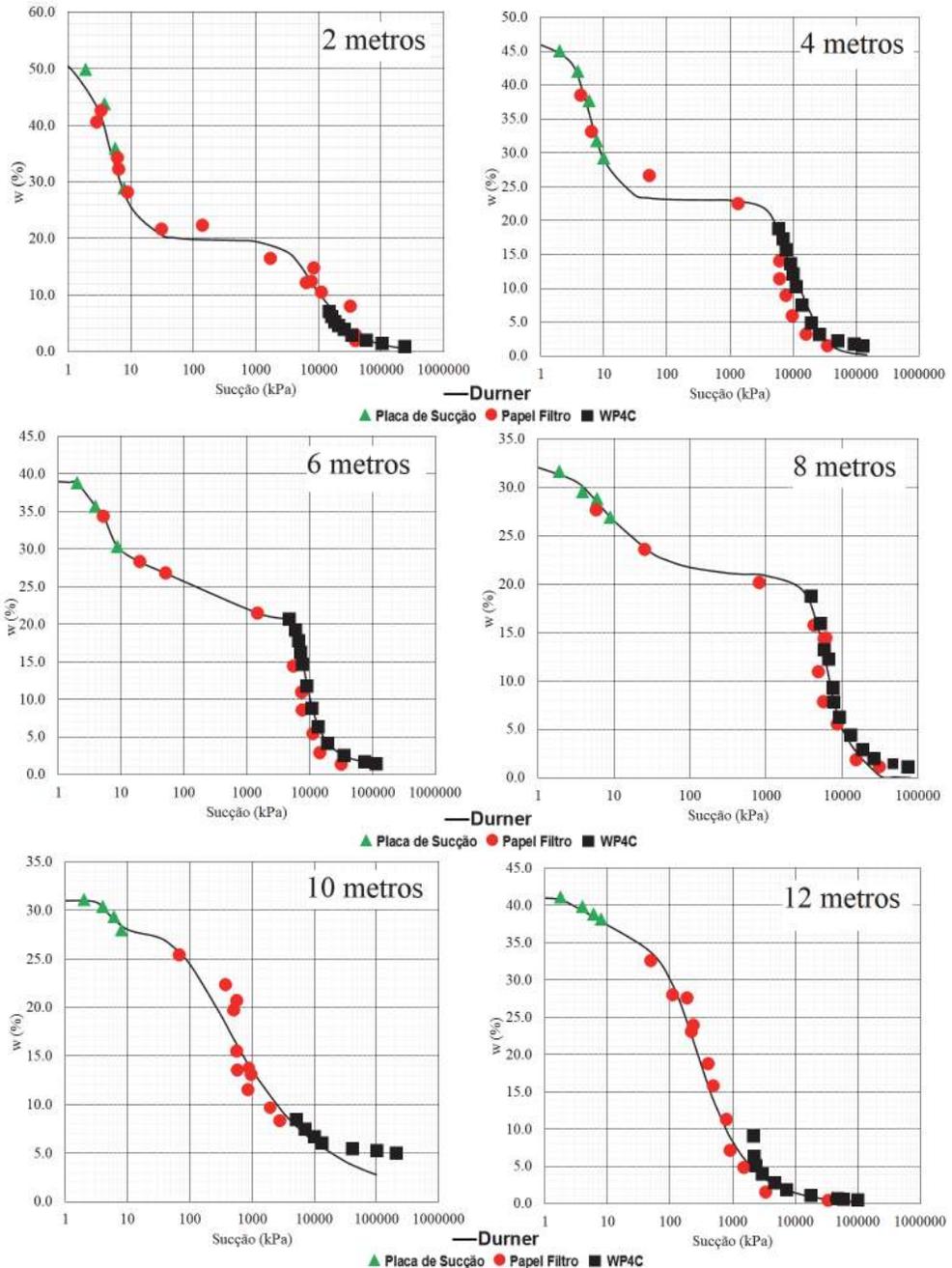


Fig. 18 – Curvas Características do Perfil de Solo em Estudo.

6m e mesmo para 8 m, devido a elevada agregação da fração argila a entrada de ar no solo se dá inicialmente nos macroporos se situando na faixa correspondente à areia média, ou seja, inferior a 7,5 kPa. Porém, dado o fato dos agregados serem constituídos predominantemente por fração argila eles se submetem a entrada de ar, entrada de ar nos criptoporos constituintes dos agregados, para valores de sucção da ordem de 4000 kPa. De um modo geral, percebe-se nesta Figura um bom ajuste dos resultados obtidos, incluindo-se os oriundo do WP4C, ao modelo proposto por Durner (1994).

O Quadro 4 sintetiza os principais parâmetros definidores das curvas características mostradas na Figura 18. Observa-se neste Quadro que existe uma diferença entre as unidades correspondentes à saturação inicial dos solos e aquelas correspondentes à entrada de ar nos microporos. Essa diferença é função de dois fatores: à diminuição da porosidade do solo por efeito de contração com o aumento da sucção e à formação de meniscos capilares na superfície do agregado do solo na fase que antecede a entrada de ar na amostra. O primeiro fator pode ser avaliado e considerado por meio de medidas do índice de vazios do corpo de prova. Já o segundo, pode ser estimado a partir da análise das imagens microscópicas.

Quadro 4 – Parâmetros oriundos das Curvas Características dos Solos Estudados

Prof. (m)	e_0	w_{0sat} (%)	Ψ_{EAMA} (kPa)	w_{EAMA} (%)	Ψ_{EAMI} (kPa)	w_{EAMI} (%)	Sr_{EAMI} (%)
2	1,587	49,9	6	49	1240	18	31
4	1,227	45,0	5	44	7070	17	37
6	1,171	38,8	5	38,4	1511	20	46
8	1,045	31,7	4	31,2	1200	18	47
10	0,941	31,1	90	31	869	15	51
12	0,933	41,1	90	40,8	1500	5	13

onde:

e_0 = índice de vazios inicial;

w_{0sat} = umidade inicial de saturação;

Ψ_{EAMA} = pressão de entrada de ar dos macroporos;

w_{EAMA} = umidade correspondente ao ponto de entrada de ar nos macroporos;

Ψ_{EAMI} = pressão de entrada de ar nos microporos;

w_{EAMI} = umidade correspondente ao ponto de entrada de ar nos microporos;

Sr_{EAMI} = saturação correspondente ao microporos.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos tropicais apresentam propriedades físico-químicas, mineralógicas e estruturais que se alteram com o grau de intemperismo sofrido e o nível de intemperização diminui com o aumento da profundidade no perfil de alteração.

Observou-se que a camada de transição, ocorrem dois tipos de estrutura, uma vinculada à rocha de origem e outra resultante das agregações formadas durante o processo de intemperização. Essa característica estrutural heterogênea dessa camada conduz à heterogeneidade de propriedades físicas e de comportamento.

A microestrutura e a curva característica guardam relação direta com essas propriedades e intervêm diretamente no comportamento hidromecânico dos solos o que torna de grande relevância análises mais acuradas desses dois elementos.

As análises realizadas permitem verificar que quanto maior a profundidade no perfil de intemperismo estudado, menor o intemperismo sofrido e por consequência menor a alteração estrutural e químico-mineralógica fazendo com que a macroporosidade que se faz presente nas camadas mais superficiais tenda a desaparecer com o aumento da profundidade.

Observa-se que ela passa de uma média de valor máximo de 41% para 14% no último metro observado (12 m), correspondente ao solo saprolítico.

A microporosidade apresenta um comportamento diferente da macroporosidade, ou seja, ela tende a apresentar pequenas reduções com o aumento da profundidade no solo profundamente intemperizado apresentando redução mais significativa ao adentrar no solo saprolítico.

Conclui-se que a macroporosidade e a microporosidade têm a mesma tendência de variação ao longo do perfil de solo analisado, ou seja, elas diminuem com o aumento da profundidade. A macroporosidade tem maior queda que a microporosidade, pois enquanto aquela é fruto de transformações estruturais geradas por processos pedogenéticos e de lixiviação mais intensos nos solos mais superficiais do perfil de alteração, esta última está muito associada à sua origem, no caso residual.

Os estudos e análises realizados nesse artigo permitiram por meio do uso de microscopia eletrônica de varredura a baixo vácuo e de resultados de sucção obtidos por meio de ensaios de placa de sucção, papel filtro e WP4C uma melhor avaliação da microestrutura dos solos e de sua influência nas curvas características de um perfil de solo tropical envolvendo solos profundamente intemperizados, solo de transição e solos saprolíticos. As imagens obtidas para amostras coletadas nas diferentes profundidades mostraram que as análises microscópicas realizadas com secagem e metalização afetam a microestrutura do solo.

A equação de ajuste apresentado por Durner (1994) mostrou ser possível a junção dos resultados oriundos de ensaios de placa de sucção, papel filtro e WP4C na obtenção da curva característica em termos de sucção mátrica para perfis de intemperismo tropical como o estudado. O uso do ensaio WP4C, apesar de medir sucções totais foi possível devido ao fato da sucção mátrica apresentar valores próximos da sucção total na zona correspondente aos menores poros presentes nos solos estudados, em especial os microporos.

As curvas características apresentaram as seguintes observações: i) as curvas características encontradas são típicas de perfis de intemperismo tropicais, assumindo no perfil estudado característica bimodal para as profundidades 2 m, 4 m e 6 m; ii) para a profundidade de 8 m correspondente à zona de transição, embora seja pouco evidenciada a zona de macroporos a curva mostra claramente a entrada de ar nos microporos dos agregados; iii) a curva característica obtida para a profundidade de 10 m foi a que apresentou o pior ajuste em relação ao modelo de Durner (1994); iv) para a profundidade de 12 m a curva assume um formato contínuo sem a presença marcante de macro e microporos.

Para os solos profundamente intemperizados de comportamento bimodal, encontrou-se que se a predominância dos maiores poros (macroporos) e poros menores (microporos), enquanto que para os solos saprolíticos a distribuição de poros se tornou uniforme. Ao observar as imagens obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura e os cálculos realizados no Quadro 3, vemos que a distribuição de poros se correlaciona com os aspectos obtidos nas curvas características.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015b) nos solos tropicais a estrutura altera-se ao longo do perfil de intemperismo. As análises de distribuição de poros realizadas sobre imagens com 100x e 5000x de ampliação no âmbito deste estudo, confirmam esse entendimento e mostram que elas podem, a partir de avaliações relativamente simples, fornecer informações preciosas sobre as distribuições de poros presentes nos solos.

As análises realizadas permitiram constatar para o perfil de solo estudado que nos solos mais intemperizados ocorre o predomínio dos poros de maior dimensão e ao se atingir os solos saprolíticos passam a predominar os poros de menor dimensão.

Em termos microestruturais observou-se que os primeiros metros do perfil estudado não apresentaram variações significativas, e os agregados observados nessas profundidades apresentam formas e características de superfície semelhantes tendem a ser arredondados com presença de poros de pequena dimensão visíveis na superfície. No início do horizonte de transição, à profundidade de 8 metros, a estrutura se diferencia das camadas superiores, pois além de apresentar zonas intemperizadas com a presença de agregados, apresenta também porções menos intemperizadas nas quais já começa a aparecer partículas minerais independentes dos agregados e mesmo na forma de pacotes de argila. Para a profundidade de 12 metros se tornam marcantes a presença de partículas isoladas e pacotes de partículas, e se observa uma distribuição de poros mais uniforme com ausência da característica dos macroporos formados pelos agregados presentes no horizonte profundamente intemperizado.

Dentro dos objetivos desta pesquisa estava encontrar a configuração estrutural do solo em estado natural e verificar como ela varia com a profundidade.

A associação realizada nesse artigo entre as características microestruturais dos solos estudados e a forma das curvas características apontam para a relevância do conhecimento da microestrutura para o entendimento do comportamento hidromecânico dos solos, em especial aqueles compondo os perfis de intemperismo tropical. Essas informações poderão ser igualmente úteis na definição do potencial de utilização dos solos em seus diferentes níveis de intemperização nas obras de engenharia como construções de rodovias e barragens.

Ressalta-se com esse estudo a importância de se analisar os solos tropicais desde sua formação até componentes que influenciam no seu comportamento hidromecânico, tais como, a microestrutura e as curvas características, tornando possível otimizar projetos e execuções de obras geotécnicas e reduzir os riscos de problemas futuros.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Deus, à empresa Furnas Centrais Elétricas S.A e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. Este trabalho apresenta parte do estudo desenvolvido no Programa de P&D da ANEEL – projeto intitulado Metodologias e infraestrutura tecnológica para ampliação da confiabilidade e otimização de empreendimentos de energia.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 9604. (2016). *Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas*. ABNT, Rio Janeiro, RJ: 9p.
- Alonso, E. E., Pereira, J. M., Vaunat, J., Olivella, S. (2010). *A microstructurally based effective stress for unsaturated soils*. *Geotechnique*, 60 (12), 913–925.
- Camapum de Carvalho, J.; Leroueil, S. (2004). *Curva Característica de Sucção Transformada*. *Solos e Rochas*, 27(3): 231-242.
- Camapum de Carvalho, J.; Gitirana JR, G. F. N.; Machado, S.L.; Mascarenha, M.M.A.; Silva Filho, F.C. (2015a). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 759p.
- Camapum de Carvalho, J.; Rezende, L.R.; Cardoso, F.B.F.; Lucena, L.C.F.; Guimarães, R.C.; Valencia, Y.G. (2015b). *Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations*. *Transportation Geotechnics*, v. 5, p. 3–19.
- Camapum de Carvalho, J.; Guimarães, R. C.; Siddiqua, S.; Bigdeli, A.; Barreto, P.N.M. (2017). *Relação entre a plasticidade do solo e o ponto de entrada de ar na curva característica de retenção de água*. *Simpósio de prática de engenharia geotécnica na região centro oeste (Geocentro 2017)*. Goiânia GO.
- Cardoso, F.B.F. (2002). *Propriedades e comportamento mecânico de solos do planalto central brasileiro*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-009A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357 p.
- Chandler, R. J.; Crilley, M. S.; Montgomery-Smith, G. (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for lowrise buildings. *Proc. Instn. Civ. Engrs Civ. Engng.* 92, May, 82-89.
- Decagon Devices (2013). *Meter Group, Inc. USA: Operator's manual WP4C dewpoint potentiometer*. 40 p.

- Dedavid, B.A.; Gomes, C.I.; Machado, G. (2007). *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 60 p.
- Durner, W. (1994). *Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure*. Water Resources Res., 30: 211–223.
- Feuerharmel, C.; Gehling, W.Y.Y.; Bica, A.V.D. (2005). *Determination of the Soil-Water Characteristic Curve of Undisturbed Colluvium Soils*. In: International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, EXPERUS 2005, Trento (Itália).
- Gerscovich, D.M.S. (2001). *Equações para modelagem da curva característica aplicada a solos brasileiros*. 4o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ABMS, Porto Alegre, RS, 1: 76-92.
- Gitirana Junior, G.F.N.; Marinho, F.A.M.; Soto, M.A.A. (2015). *A curva de retenção de água de materiais porosos*. In: Camapum de Carvalho, J.; Gitirana Junior, G.F.N.; Machado, S.L.; Mascarenha, M.M.A.; Filho, F.C.S. (Orgs.). Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 9.
- Grau, E.D.A. (2014). *Efeito da Variação de Umidade no Empuxo em Solos Tropicais*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-240/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014, 105p.
- Guimarães, R.C. (2002). *Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 091A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- Hinrichs, R.; Vasconcellos, M.A.Z. (2014). *Microscopia eletrônica de varredura (MEV) em baixo vácuo*. In: HINRICHES, R. (Org). Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: IGEO/UFRGS. cap. 7.
- Klein, V.A.; Libardi, P.L. (2002). *Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. Ciência Rural, Santa Maria, v. 32, n. 6, p.945-953.
- Lopera, J.F.B. (2016). *Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-272A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.
- Marcelo, V. F.; Almeida, B. G.; Araujo Filho, J. C.; Souza, W. L. S. (2016) *Influência de condicionadores na distribuição de poros em um argissolo amarelo distrocoeso*. In: III Reunião Nordestina de Ciência do Solo, 2016, Aracaju-SE. III Reunião Nordestina de Ciência do Solo.
- Maliska, A.M. (2005). *Microscopia eletrônica de varredura*. Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 97 p.
- Marinho, F.A.M. *A técnica do papel filtro para medição de sucção*. Encontro sobre Solos Não Saturados, Rio Grande do Sul, 1: 112-125, 1995.

- Mendonça, A.F., Lima, A., Barros, J.G.C., Cortopassi Jr., R.; Cortopassi, R. (1994). *Critérios geológicos e geotécnicos para execução de sondagens na área do Distrito Federal*. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Foz do Iguaçu, PR, 2: 389-395.
- Otálvaro, I.F. (2013). *Comportamento hidromecânico de um solo tropical compactado*. Dissertação de doutorado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143p.
- Queiroz, A.C.G. (2015). *Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados*. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127p.
- Rodrigues, S. M. (2017) *Caracterização Mineralógica e Microestrutural de um Perfil Intemperizado de Brasília*. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 133p.
- Roseno, J. L.; Camapum de Carvalho, J. (2007). *Cartilla Medio Ambiente: Erosión (tradução)*. 1. ed. Cuiabá: KCM Editora & Distribuidora.
- Silva, F. C. (2017). *Curva Característica de um Perfil de Solo Tropical*. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 113p.