

Capítulo 9

ÍNDICES FÍSICOS, TEXTURA, CONSISTÊNCIA E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

Paulo Cesar Burgos
Wilson Conciani

1. INTRODUÇÃO

Os solos provenientes das áreas de clima tropical úmido apresentam peculiaridades de propriedades e de comportamentos bem distintos daqueles oriundos de regiões de clima temperado, onde se desenvolveram os sistemas convencionais de classificação de solos. As propriedades e os comportamentos desses solos são influenciados por aspectos físicos, químicos e mineralógicos associados à estrutura, que é constituída por agregados que contêm grupamentos estruturais macro e microporos resultantes de sua gênese.

Os solos tropicais não saturados ocorrem em qualquer perfil de solo, de origem residual ou não. Os solos tropicais residuais apresentam características particulares atreladas a sua gênese, provocando estruturas e composições distintas, com destaque a sua microestrutura, que se manifesta com propriedades cimentantes, sendo fundamentais na origem dos agregados e concreções, o que os fazem diferir substancialmente dos solos não tropicais.

De vasta ocorrência na área territorial do Brasil, os solos lateríticos podem ser localizados com base nos mapas de solos, pois as classes pedológicas denominadas por latossolos e argissolos, quando tratadas pela classificação geotécnica M.C.T. enquadram-se como de comportamento laterítico. Ressalta-se que, na Ciência do Solo, há apenas uma única classe de solo laterítico, que é o latossolo. O processo conhecido como latolização ou laterização consiste em atividade pedogenética decorrente do desenvolvimento de pH na faixa aproximada de 4,5 a 7,0, possibilitando a intensa lixiviação das bases e da sílica e a consequente concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Esses óxidos desempenham função cimentante.

Neste capítulo, são abordadas as peculiaridades referentes aos solos tropicais lateríticos e saprolíticos, que as diferenciam dos solos não tropicais. Isso se fará percorrendo-se sobre algumas características e propriedades de identificação e caracterização. Isso se faz necessário porque os solos tropicais não se enquadram de maneira satisfatória na mecânica dos solos clássica, exigindo, do meio técnico, estudos que retratem melhor suas propriedades e o seu comportamento.

Os índices físicos são propriedades que caracterizam o solo em um dado instante a partir de proporções entre massas e volumes que ocorrem em suas fases. Esses índices, normalmente, são alterados no decorrer do tempo, principalmente, por ações advindas da natureza, mas também por ações antrópicas. Seguidamente, discorre-se sobre a textura do solo, que representa a forma de ocorrência e disposição de suas partículas sólidas, em geral, constituídas de dimensões, formas e proporções bastante variadas. Abordam-se aspectos correspondentes à consistência do solo, que está intimamente relacionada ao tipo de argilomineral e à quantidade de água presente, implicando, assim, os estados de consistência que um material argiloso pode experimentar. Nas características de textura e consistência, consideram-se as particularidades dos materiais tropicais, revelando-se a influência, principalmente, da microestrutura nessas propriedades.

Por fim, reporta-se sobre os sistemas tradicionais de classificação de solos, comumente utilizados no meio técnico, sendo eles o Sistema U.S.C.S. (unificado) e o Sistema T.R.B., desenvolvidos com base em solos provenientes de ambiente de clima temperado, sob condições bastante distintas daquelas que ocorrem nas regiões tropicais úmidas, onde a ação do intemperismo químico se manifesta de forma mais intensa em comparação ao intemperismo físico, gerando perfis de alteração mais espessos. Cabe destacar o advento de uma nova classificação geotécnica com base nos solos tropicais do Brasil, denominada Classificação M.C.T., desenvolvida em decorrência de algumas limitações dos sistemas tradicionais de classificação quando aplicadas aos solos tropicais. Também se inclui a técnica de adsorção de azul de metileno. Essa técnica promissora é indicada para a caracterização da fração fina de solos tropicais.

A classificação geotécnica convencional mostra dificuldade quando aplicada aos solos tropicais por não considerar as peculiaridades que esses materiais apresentam devido ao seu processo de formação, que confere propriedades físicas, químicas, mineralógicas e de estrutura particulares. Nos solos lateríticos ocorre uma agregação significativa por cimentação dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Para o caso dos solos saprolíticos essa agregação se manifesta bastante reduzida. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de realizar adaptações aos sistemas convencionais e/ou desenvolver métodos mais adequados para lidar com esses solos, como exemplo, cita-se o surgimento da classificação geotécnica M.C.T.

Como já reportado, as bases da mecânica dos solos clássica foram originadas em regiões de clima temperado. Os estudos correspondentes à mecânica dos solos não saturada representam uma área que se encontra ainda em desenvolvimento no que se refere aos aspectos conceituais e de experimentos. Isso revela tópicos que ainda são objeto de pesquisas e desafios do meio técnico, especificamente, para os técnicos brasileiros em função da extensa área territorial que exibem os mais diversos solos tropicais.

Devido à importância dos estudos relacionados aos solos tropicais para o mundo, ocorreu no Brasil, no ano de 1985, a Primeira Conferência Internacional de Geomecânica em Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos, tornando-se um marco representativo para o tema.

Aqui cabe lembrar que o capítulo 3 deste livro mostrou a distribuição de poros na estrutura dos solos tropicais e saprolíticos. Essa distribuição, em geral, bimodal, é um dos fatores que diferenciam os solos tropicais dos demais solos. O elevado grau de intemperização desses solos o levam a formar *peds* ou aglomerados de partículas. No interior destes *peds*, existem vazios menores que aqueles dos espaços intergranulares. Camapum de

Carvalho & Gitirana Júnior (2021) mostram esse fato tanto por trabalhos de porosimetria quanto por micrografias.

Essa distribuição porosimétrica diferenciada afeta inclusive as análises de plasticidade, granulometria e massa específica. A desagregação desses *peds* reduz o tamanho dos grãos, muda a relação de vazios e, por conseguinte há uma mudança no comportamento do solo. Essa mudança se apresenta nas propriedades índices do solo.

A classificação dos solos tropicais passa a ser um desafio para os sistemas tradicionais. Este capítulo tem a intenção de mostrar os impactos dessas mudanças na classificação do solo, bem como outras alternativas de classificação que permitam inferir seu comportamento nas obras e serviços geotécnicos.

2. ÍNDICES FÍSICOS

A determinação dos índices físicos traduz um conhecimento importante para a devida identificação do estado em que o solo se encontra em um dado momento. Em laboratório, comumente, determina-se de forma direta, três índices físicos: o teor de umidade, a massa específica do solo e a massa específica dos sólidos. Esses índices são determinados com normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Os demais índices físicos do solo são obtidos mediante fórmulas de correlação.

Fredlund e Rahardjo (1993) comentam que os solos são encontrados na natureza como mistura de várias fases. Uma mistura de partículas sólidas e ar constitui um solo seco. Por outro lado, uma mistura de partículas sólidas e água constitui o solo saturado. Entre esses dois extremos, têm-se os solos não saturados, que se constituem de partículas sólidas, água e ar em percentagens volumétricas distintas.

Conforme Lambe e Whitman (1969), um solo não saturado é considerado como um sistema trifásico, isto é, constituído de três fases: líquida (água), gasosa (ar) e sólida (partículas de minerais). Fredlund e Morgenstern (1977), com base na definição de fase, sugerem que se deve considerar uma quarta fase independente, denominada interface ar-água (película contrátil).

A característica mais importante da película contrátil é a possibilidade de ela exercer uma tensão de tração nos materiais contíguos, denominada tensão superficial. Devido à ação dessa tensão, a interface ar-água comporta-se como uma membrana elástica. Se a fase gasosa for contínua, tal membrana interage com as partículas sólidas, influenciando o comportamento mecânico do solo. Existindo água intersticial ou bolhas de ar oclusas no solo, diz-se que o meio multifásico não é mais um meio contínuo. Assim, o solo não saturado pode ser analisado como um sistema bifásico, como os solos saturados, desde que se assuma que um fluido compressível preencha os poros (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Ainda, segundo esses autores, em relação ao comportamento, o solo não saturado pode ser considerado um sistema de duas fases que entram em equilíbrio (partículas de solo e película contrátil) e outras duas que fluem (ar e água) ao se aplicar um gradiente de tensão. Nas correlações massa e volume, é possível considerá-lo um sistema trifásico, já que o volume da interface ar-água é muito pequeno e sua massa pode ser considerada como parte da massa de água. Entretanto, quando se analisa o estado de tensão de um sistema multifásico contínuo, é necessário fazer com que a interface ar-água se comporte como uma fase independente.

Sabe-se que a água é o único líquido inorgânico que se manifesta de forma natural na terra. Ela se constitui, também, no único composto químico que se apresenta naturalmente nos três estados físicos, a saber, sólido, líquido e gasoso. Esses estados são dependentes da temperatura e da pressão. A molécula de água possui dois polos dotados de cargas contrárias que conduz à formação de enlaces estáveis entre as moléculas e exige energia considerável para a destruição desse enlace. Disso decorre que há necessidade de muita energia para ocorrer a evaporação ou liberação de uma molécula de água. O ar é uma mistura de diversos gases que se apresentam com quantidades distintas de vapor de água. Se não ocorre vapor de água, o ar é denominado de ar seco. Quando há vapor de água, esse é o ar úmido. Esses dois materiais podem ser considerados um gás de comportamento ideal sob pressão e temperatura, que ocorre no âmbito da engenharia de solos. Em relação à interação entre o ar e a água, no caso de solos não saturados, adota-se, comumente, o modelo capilar, no qual o menisco capilar reflete a diferença de pressão existente entre o ar e a água, o que se denomina sucção matricial. Na água, o ar se apresenta como uma mistura imiscível ou uma mistura separada da água pela película contrátil. Cabe informar que estudos realizados revelam que o espaço disponível para o ar na estrutura molecular da água é de, aproximadamente, 2% do seu volume.

Gitirana Jr. *et al.* (2012) comentam que, para os solos tropicais profundamente intemperizados, os solos lateríticos, deve-se atentar para os macroporos, visto a sua constituição ser resultante de agregação de partículas minerais que estabelecem a presença de microporosidade no interior dos agregados, que é preenchida por água e/ou ar. A continuidade das fases fluidas no solo não saturado varia à medida que o solo for submetido à variação de grau de saturação.

A Figura 1 ilustra um elemento idealizado de solo não saturado com fase ar contínua, proposto por Fredlund e Rahardjo (1993), enquanto a Figura 2 mostra os diagramas propostos por esses autores correspondentes aos modelos rigoroso e simplificado, notando-se a incorporação de uma nova fase denominada interface ar-água, também conhecida como película contrátil.



Figura 1 – Elemento de solo não saturado com fase ar contínua (modificado de Fredlund e Rahardjo, 1993)

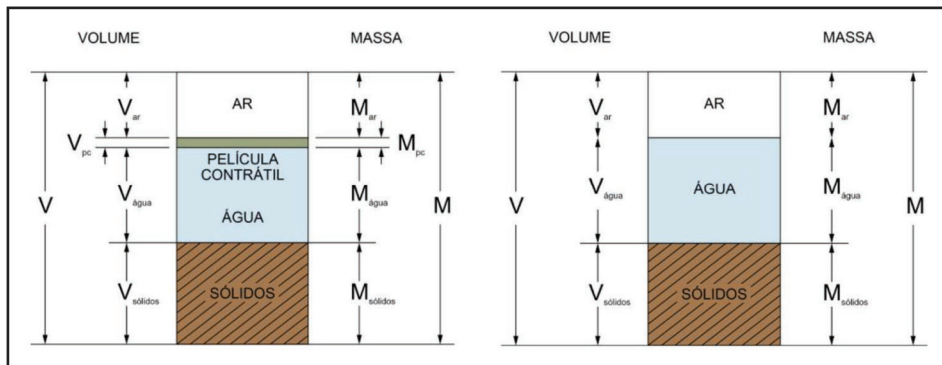


Figura 2 – Modelos rigoroso e simplificado das fases de um solo não saturado, conforme proposição de Fredlund e Rahardjo (1993)

2.1 Relação entre massas

O teor de umidade gravimétrico (w) do solo é definido como a relação entre a massa de água (M_w) e a massa de sólidos (M_s), correspondente a um mesmo volume de solo, indicado em percentagem:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (\text{Eq. 1})$$

O teor de umidade gravimétrico apresenta limite inferior igual a zero e o seu limite superior é indefinido, podendo ocorrer valores superiores a 100%.

2.2 Relação entre volumes

Comumente, definem-se três índices físicos a partir de relações volumétricas, sendo esses, porosidade, índice de vazios e grau de saturação.

Entende-se, por porosidade (n) a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total de solo (V), expresso em percentagem, com variação no intervalo de 0 a 100%. Nogueira (1998) comenta que, como os sólidos são considerados incompressíveis, dentro do intervalo de tensões normalmente aplicadas nos projetos comuns de engenharia, qualquer variação no volume de um solo será acompanhada de igual variação no seu volume de vazios. Então, numerador e denominador da equação (2) variarão em um mesmo sentido. Desse modo, a porosidade não nos permite acompanhar a variação de volume do solo ao longo do tempo quando submetido a um carregamento.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (\text{Eq. 2})$$

Fredlund e Rahardjo (1993) reportam que, de forma similar, pode-se definir a porosidade em relação a cada fase do solo, a saber:

$$n_s = \frac{V_s}{V} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$n_w = \frac{V_w}{V} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$n_a = \frac{V_a}{V} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$n_c = \frac{V_c}{V} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde:

n_s = porosidade das partículas do solo (%).

n_w = porosidade de água (%) [percentagem do volume de vazios ocupados por água].

n_a = porosidade de ar (%) [percentagem do volume de vazios ocupados por ar].

n_c = porosidade da película contrátil (%).

Fredlund e Rahardjo (1993) comentam, ainda, que o volume associado com a película contrátil (interface ar-água) pode ser assumido como sendo desprezível ou incorporado à fase da água. A soma das porosidades de todas as fases deve ser igual a 100%. Destaca-se que a porosidade da água (n_w) é denominada de teor de umidade volumétrico (θ_w) nas áreas Agrônômica e de Ciência do Solo.

O índice de vazios (e) é definido como a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume de sólidos (V_s) para um mesmo volume de solo, conforme a equação:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{Eq. 7})$$

Esse parâmetro que indica a variação volumétrica do solo ao longo do tempo e perante aplicação de carregamentos externos; visto que o volume de sólidos é constante, as variações volumétricas que ocorrem são função da variação do índice de vazios. Apresenta-se, em seu limite inferior, com valor numérico maior que zero e o seu limite superior não é bem definido, sendo dependente da estrutura do solo.

O grau de saturação (S_r) representa a relação entre o volume de água (V_w) e o volume de vazios (V_v), para um mesmo volume de solo, expresso em percentagem. O intervalo de variação desse índice físico compreende o intervalo entre 0 e 100%, representando, respectivamente, em seu extremo inferior, o solo seco e, no seu extremo superior, o solo saturado. Por consequência, entre esses dois extremos, encontra-se a condição de estado que representa o solo não saturado.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (\text{Eq. 8})$$

Conforme comentado, outra forma de se determinar o teor de umidade de um solo consiste em se empregar o conceito da umidade volumétrica (θ_w) que representa a relação entre o volume de água (V_w) e o volume total do solo (V), de acordo com a Equação 9:

$$\theta_w = \frac{V_w}{V} \quad (\text{Eq. 9})$$

Ela pode ser expressa em relação ao grau de saturação substituindo-se a Equação 8 na Equação 9, tem-se:

$$\theta_w = \frac{S_r V_v}{V} \quad (\text{Eq. 10})$$

Como V_v/V representa a porosidade, a Equação 10 poderá ser reescrita da seguinte forma:

$$\theta_w = S_r n \quad (\text{Eq. 11})$$

2.3 Relação entre massa e volume

A massa específica do solo (ρ) referente a um teor de umidade distinto dos extremos que caracterizam um solo seco e um solo saturado é definida como a relação entre a massa do solo (M) e o volume do solo (V), expressa em g/cm^3 :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{Eq. 12})$$

A massa específica do solo seco (ρ_d) corresponde ao extremo inferior de umidade, ou seja, o solo seco, que é representado por grau de saturação nulo. Em algumas situações, há necessidade de se empregar o referido índice para a resolução de alguns problemas de geotecnia. Consiste na relação entre a massa do solo seco (M_s) e o volume do solo (V), expressa em g/cm^3 :

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (\text{Eq. 13})$$

De maneira, oposta, tem-se a massa específica do solo saturado (ρ_{sat}), que traduz o teor de umidade máximo do solo, representado pelo estado de solo saturado, definida como sendo a relação entre a massa de solo saturada (M_{sat}) e o volume de solo (V), expressa em g/cm^3 .

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{M_{\text{sat}}}{V} \quad (\text{Eq. 14})$$

Tratando-se da massa específica do solo nos estados seco e saturado, informa-se que não se considerou uma possível variação de volume decorrente da perda de umidade na etapa de secamento, como também do ganho de umidade na etapa de saturação. Esses fenômenos conhecidos como retração e expansão serão discutidos mais adiante.

A massa específica dos sólidos (ρ_s) indica um valor médio das massas que constituem a fase sólida do solo, revelando a influência dos minerais e de as proporções que o formam. É definida como sendo a relação entre a massa de sólidos (M_s) e o correspondente volume de sólidos (V_s):

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{Eq. 15})$$

Esse índice físico também pode ser expresso como densidade real dos grãos, G_s , parâmetro adimensional. A determinação da massa específica dos sólidos obedece às orientações da NBR 6458, anexo B da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

Ressalta-se que em regiões de clima temperado, os solos se apresentam com baixo teor de oxi-hidróxido de ferro, e a densidade real se manifesta na ordem de 2,65. Nas regiões de clima tropical, de maneira oposta, ocorrem valores elevados, próximo de 3,00. Destaca-se, também, que os solos lateríticos têm sua densidade real influenciada pela presença de poros isolados no interior dos seus agregados.

Poder-se-á expressar as relações entre massas e volumes, fazendo-se uso do peso em detrimento da massa, originando, assim, o peso específico, cuja simbologia é γ , e tem como unidade no Sistema Internacional kN/m^3 . Esse conceito é importante na engenharia por tratar da relação de forças e pesos em lugar de massas. Dessa forma, é possível trabalhar na determinação de cargas, tensões e pressões que atuam no maciço de solo e nas fundações.

Um caso em que a relação de pesos é essencial é quando um solo se encontra abaixo do nível de água, quando se tem a ação do empuxo. Para esse caso, emprega-se o peso específico submerso (γ_{sub}). Este, por sua vez, é definido como a diferença entre o peso específico do solo saturado (γ_{sat}) e o peso específico da água (γ_w).

$$\gamma_{\text{sub}} = \gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (\text{Eq. 16})$$

3. TEXTURA E CONSISTÊNCIA

A variação das dimensões e formas das partículas que constituem a fração sólida do solo é muito diversificada. Os solos grossos, pedregulhos e areias possuem grãos que são perceptíveis a olho nu, diferentemente dos grãos de argilas, que, em conjunto com os siltes formam os solos finos.

A análise granulométrica define, de forma separativa, as frações do solo, elencando-as e, normalmente, as frações correspondentes ao pedregulho e areia se apresentam com forma aproximadamente esferoidal ou angulosa, atentando-se que o tipo de gênese interfere na característica de como esses ocorrem. Em relação à parte fina, os argilominerais se manifestam predominantemente na forma laminar.

De acordo com Jacintho *et al.* (2012), a textura constitui um dos principais aspectos físicos que distinguem os solos tropicais lateríticos dos demais tipos de solos. Enquanto nos demais tipos de solos, de um modo geral, é possível pensar na textura como a granulometria das partículas individualizadas dos minerais, nos solos lateríticos, as partículas individualizadas, mesmo no caso das argilas, dificilmente se apresentam com propriedades e comportamentos que refletem a própria individualidade. Isso se deve à participação dos minerais de argila e mesmo dos minerais primários, em grupamentos estruturais, os macros e microagregados, que apresentam características próprias, conferindo, ao solo, comportamentos distintos daqueles que refletiriam o do solo contendo as partículas individualizadas. Essa situação impacta no procedimento de análise granulométrica, uma vez que, durante o ensaio, os referidos *peds* podem se desagregar. Por isso, dependendo do objetivo, os ensaios podem ser feitos com ou sem defloculante, com ou sem uso de ultrassom. A técnica de preparo da amostra interfere no resultado, pois a secagem e o destorroamento podem desmanchar esses microagregados.

No meio técnico existem procedimentos distintos em relação ao ensaio de sedimentação.

Recomenda-se utilizar o defloculante químico para situações em que o solo se submeterá à percolação de contaminantes e/ou a um tipo de estabilização química. O emprego da técnica de ultrassom está relacionado a situações que prevaleçam em campo solicitações vibratórias, como estrutura de pavimento compactada. Quando se pretende obter a condição de agregação do material representativa do solo no seu estado natural, deve-se utilizar a sedimentação sem defloculante e sem agitação mecânica, podendo também empregar o granulômetro ou álcool. Importante notar que a curva granulométrica que indica a preservação das agregações do solo que ocorrem em seu estado natural tende a exibir o comportamento geotécnico mais próximo da realidade para diversas propriedades.

O ensaio de sedimentação realizado em conformidade com a ABNT NBR 7181, que indica o emprego de defloculante químico, tem a função de dispersar as partículas minerais constituintes dos solos, visando à sedimentação dos grãos de maneira isolada, por consequência, determinando seus diâmetros equivalentes, sendo utilizada para fins de obtenção da análise granulométrica do solo. Quando o ensaio de sedimentação é realizado de acordo com o que estabelece a ABNT NBR 13602, que preconiza não se utilizar o defloculante químico, apenas água destilada, a sedimentação dos grãos ocorre com as partículas minerais agrupadas, ou seja, como se encontram na natureza, consequentemente, sedimentam-se mais rapidamente, revelando diâmetros maiores, que são das agregações e não das partículas. A Figura 3 ilustra, de forma comparativa, as curvas granulométricas provenientes dos ensaios de sedimentação realizados com o uso de defloculante químico e de agitação mecânica e aquele sem o defloculante químico e sem a agitação mecânica. Nessa Figura nota-se, por exemplo, a diferença das percentagens passantes para a fração menor que 0,002 mm. No caso do emprego do defloculante, tem-se 41% de argila e sem uso do defloculante tem-se 20% de argila. Cabe observar que quanto mais próximas são as curvas granulométricas obtidas por esses dois procedimentos, maior será a percentagem de dispersão do solo:

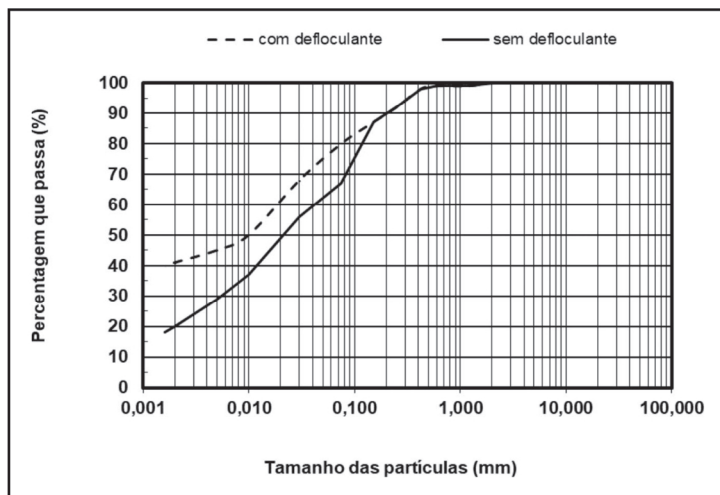


Figura 3 – Curvas granulométricas comparativas de um solo com a utilização do defloculante químico e sem a utilização do defloculante químico

Os processos pedogenéticos conferem aos solos lateríticos, uma cimentação por meio dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, principalmente goethita e gibsit, que formam pacotes, agregados concreções dotadas de estabilidade estrutural, implicando peculiaridade de comportamento. Como as partículas minerais desses solos se manifestam em aglomerações de agregados é de fundamental importância a condução dos ensaios granulométricos com e sem defloculante, diante das diferenças de resultados que esses solos mostram devido à forma de ocorrência microagregada desses materiais no seu estado natural.

Os solos saprolíticos, genuinamente residuais, com distintos graus de intemperização se manifestam com granulometria muito variável. Alguns estudos conduzidos com esses solos mostram fácil deflocação, ao mesmo tempo em que os ensaios realizados nesses materiais com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio e sem esse defloculante indicam curvas relativamente coincidentes, revelando que os grumos existentes nesses solos se desfazem facilmente, diferente, do que ocorre nos solos lateríticos com agregações cimentícias resistentes. Os solos saprolíticos possuem pacotes constituídos, predominantemente, por argilominerais individualizados do tipo 2:1.

Salienta-se que, muitas vezes, o comportamento dos solos tropicais é governado pelo agregado e não pela partícula de argila individualizada. Os solos lateríticos se manifestam com a fração argila constituída primordialmente por caulinita enriquecida por oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, que interferem na formação e na estabilidade do agregado e, por consequência, repercutirá nos resultados de experimentos. Neste livro a questão da estrutura será abordada em outro capítulo.

De acordo com o procedimento convencional, a curva granulométrica de um solo indica a sua classificação textural, como, também, a partir de três diâmetros específicos, poder-se-á obter informação de sua morfologia. O diâmetro efetivo (D_{ef} ou D_{10}) indica o

diâmetro em milímetros onde passa apenas 10% em massa da amostra, ou seja, tem-se apenas 10% de material com diâmetro inferior a ele, tomado na curva granulométrica. Sabe-se, que esse diâmetro fornece uma estimativa da permeabilidade de areias. De maneira análoga, define-se o D_{30} e o D_{60} , respectivamente.

O Coeficiente de não Uniformidade (C_u) é definido pela relação:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Eq. 17})$$

Esse coeficiente representa a distribuição do tamanho das partículas que constituem o solo, e valores próximos da unidade revelam curva granulométrica aproximadamente vertical, solo mal graduado, ou seja, com uma pequena amplitude da variação dos diâmetros. Quanto maior o valor numérico do Coeficiente de não Uniformidade, mais bem graduado é o solo, implicando, assim, uma suavização da inclinação da curva granulométrica e, por consequência, abrangendo uma amplitude maior do intervalo de diâmetros. Os pedregulhos bem graduados se manifestam com $C_u \geq 4$, enquanto as areias, com $C_u \geq 6$.

O Coeficiente de Curvatura (C_c) indica o formato da curva granulométrica do solo, conforme a relação:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{10} \cdot D_{60})} \quad (\text{Eq. 18})$$

Considera-se que o pedregulho e a areia são bem graduados quando o Coeficiente de Curvatura estiver compreendido no intervalo entre 1 e 3. Deve-se atentar que, principalmente os solos tropicais lateríticos se manifestam com aglomerações de torrões e agregações, ou seja, partículas não individualizadas. Esse fato pode vir a ser impeditivo para uma correta aplicação desses conceitos.

Os solos que se manifestam com quantidade apreciável de finos não podem ser corretamente caracterizados apenas pelo ensaio de granulometria; faz-se necessário agregar os ensaios de consistência, que visam quantificar as propriedades plásticas e mineralógicas. As partículas que exibem plasticidade são, notadamente, os argilominerais, porém, a fração argila se constitui, também, de outros minerais que não exprimem plasticidade.

A depender do teor de umidade, um solo argiloso apresenta características que se assemelham à de um líquido ou de um sólido. Os solos finos mostram plasticidade, que é função do tipo de argilomineral presente, e indica um estado de consistência. Assim, ocorrem estados de consistências distintos com a variação do teor de umidade do solo, sendo denominados de estado líquido, estado plástico, estado semissólido e estado sólido. No estado líquido, o solo se encontra com resistência ao cisalhamento praticamente nula, com a redução gradual do teor de umidade, o solo passará ao estado plástico, seguidamente, ao estado semissólido e, finalmente, ao estado sólido. A plasticidade do solo é dependente de diversos fatores, dentre esses, temos natureza, composição química e mineralógica da fração fina.

Com a finalidade de representar essas alterações de estados de consistências, o químico sueco Albert Atterberg conduziu pesquisas sobre as propriedades de solos finos e definiu os limites de consistência, inicialmente, direcionados aos estudos de cerâmicas.

Mais adiante, esses limites foram padronizados por Arthur Casagrande nos ensaios de determinação do limite de liquidez e limite de plasticidade. A fronteira entre o estado líquido e o estado plástico, em termos do teor de umidade, representa o limite de liquidez, enquanto a fronteira entre os estados plástico e semissólido traduz o limite de plasticidade, e o limite de contração é representado pela fronteira entre os estados semissólido e sólido. O limite de contração muitas vezes, não acompanha com fidelidade as variações de consistência dos materiais tropicais, tendo sido pouco empregado. Esses ensaios possuem normas específicas da ABNT.

Os limites de liquidez e de plasticidade são obtidos a partir de ensaios relativamente simples, mas a interpretação física desses resultados associados à composição da fração argilosa e de seus minerais é muito complexa, principalmente, no tocante aos solos tropicais, que se apresentam com a fração argila não individualizada, com agregações fortemente cimentadas.

O índice de plasticidade, que é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, em teor de umidade, define o intervalo de variação em que o solo se encontra no estado plástico. Juntamente com os parâmetros granulométricos, esses índices de consistência são utilizados com a finalidade de classificar o solo nos sistemas tradicionais de classificação. O emprego desses limites para os solos tropicais, atualmente, vem sendo bastante contestado, face aos aspectos relacionados as suas peculiaridades, manuseio, preparação e repetitividade de resultados, dentre outros.

Estudos correspondentes aos limites de liquidez e plasticidade para qualquer tipo genético de solo, seja de região tropical ou temperada, mostram que esses limites aumentam com a quantidade de argila presente no solo. Os solos tropicais, principalmente, os lateríticos, se manifestam com sua fração argila constituída predominantemente pelo argilomineral caulinita e por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que recobrem ou cimentam o argilomineral, resultando em agregações. Essas agregações vão interferir nas suas propriedades índices, por consequência na interpretação dos ensaios. Outros fatores, como pré-secagem, desidratação e amolgamento, modificam a plasticidade do solo, revelando ser um material sensível, e esses materiais expressam grande dispersão nos resultados dos ensaios de consistência, conduzidos pela sistemática convencional, face essas peculiaridades apresentadas.

Outros índices menos empregados são o índice de consistência e o índice de liquidez, determinados a partir do teor de umidade natural e dos limites de liquidez e de plasticidade. Eles visam, identificar o estado de consistência dos solos argilosos em campo.

A influência do argilomineral nas propriedades de uma argila pode ser avaliada pelo índice de atividade proposto por Skempton (1953), definido como a relação entre o índice de plasticidade e a percentagem de argila, parâmetros obtidos a partir de ensaios rotineiros nos laboratórios de mecânica dos solos. Quando esse índice for menor que 0,75, a argila é inativa; se o índice estiver entre 0,75 e 1,25, a argila é considerada como normal; e quando o índice for maior que 1,25 a argila é ativa.

A Figura 4 ilustra duas curvas granulométricas correspondentes a dois solos, areia bem graduada e a areia mal graduada. O valor de Coeficiente de não Uniformidade (C_u) para a areia bem graduada é igual a 6,7 e para a areia mal graduada 1,8, enquanto os valores de Coeficiente de Curvatura (C_c) são 1,5 e 0,7, respectivamente.

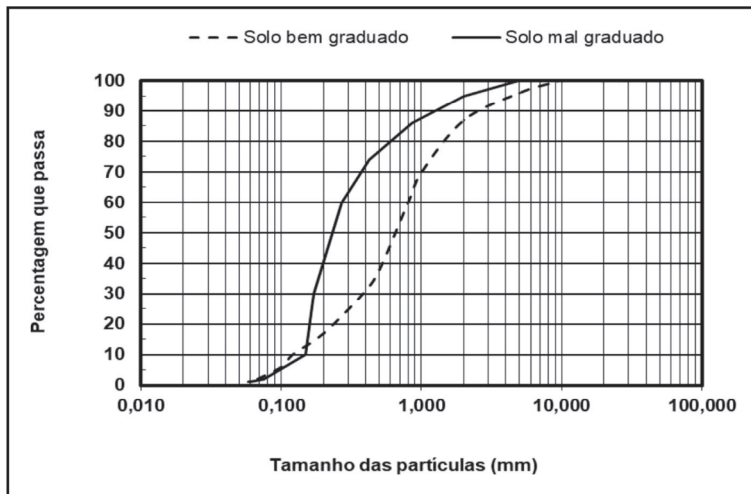


Figura 4 – Curvas granulométricas de uma areia bem graduada e de uma areia mal graduada

Tratando da curva de retenção de água em relação aos materiais que se manifestam com texturas dos tipos mal graduada ou aberta, a curva denominada bimodal se revela representativa do comportamento desses materiais. Encontra-se na Figura 5 um exemplo de curva de retenção do tipo bimodal:

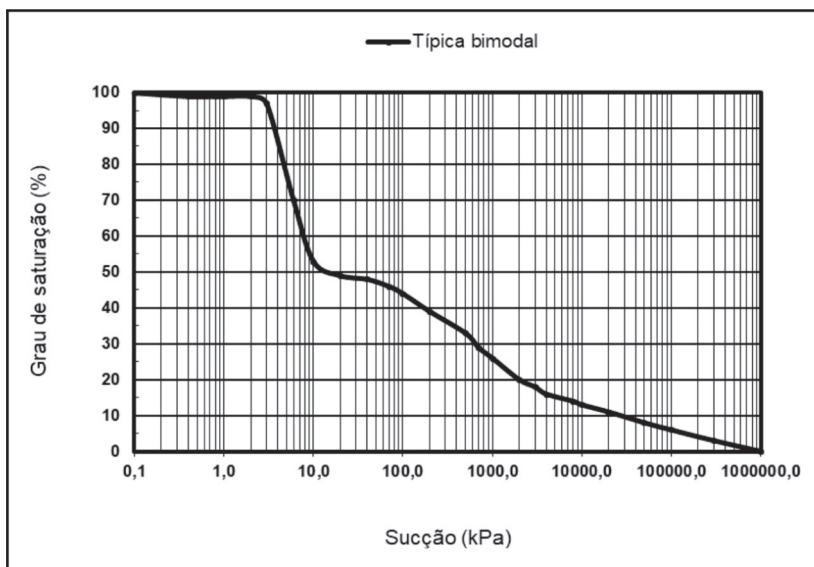


Figura 5 – Curva de retenção típica bimodal (modificado de Gitirana Jr. e Fredlund, 2004)

A carta de plasticidade apresentada na Figura 6 expressa a relação existente entre o limite de liquidez e o índice de plasticidade, sendo a “Linha A” separadora dos solos siltosos e argilosos. Os materiais predominantemente argilosos se posicionam acima dessa linha inclinada; os materiais de predominância siltosa situam-se abaixo dessa linha. A linha vertical com limite de liquidez igual a 50% separa os solos de baixa plasticidade ($w_L < 50\%$) dos de alta plasticidade ($w_L > 50\%$). Na atualidade há discussões sugerindo que quando o limite de liquidez se situar no intervalo entre 30% e 50% sejam considerados os solos como de média plasticidade:

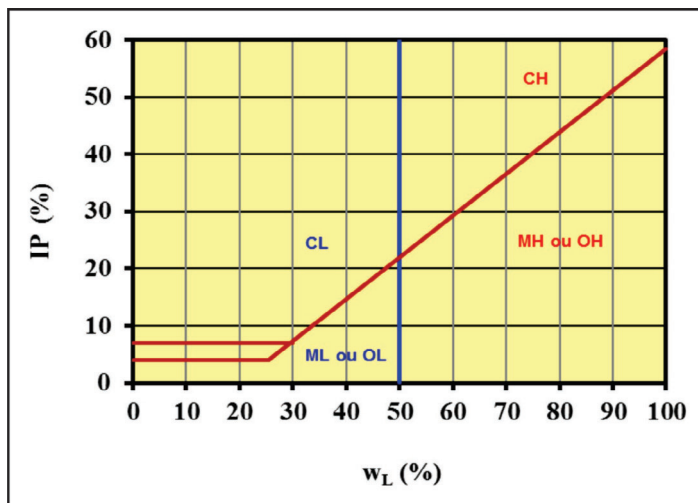


Figura 6 – Carta de plasticidade

4. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Com as grandes diferenças existentes entre os diversos tipos de solos que ocorrem nas distintas paisagens e, por consequência, em seus comportamentos, houve a necessidade do desenvolvimento de sistemas de classificação, que visam reunir materiais de aptidões e propriedades semelhantes em um mesmo grupo para a previsão preliminar de seu comportamento nas mais variadas aplicações em obras da engenharia e áreas correlatas.

Bueno e Vilar (1984) comentam ter havido, na mecânica dos solos, um considerável esforço no sentido de criar um sistema de classificação que, de fato, permita o agrupamento de solos dotados de características similares, quer sob o aspecto genético, quer de comportamento. Diferentemente das outras ciências, deve interessar à mecânica dos solos um sistema de classificação que prefira o comportamento do solo à sua constituição, à origem, à formação, etc. Não se quer, com isso, criar um desinteresse por esses últimos aspectos. Eles terão uma considerável importância, à medida que interfiram de forma significativa no comportamento do solo.

Os sistemas de classificação de solos mais difundidos mundialmente na área geotécnica são o Unified Soil Classification System - U.S.C.S. e o Transportation Research Board - T.R.B. Eles têm como base classificatória os ensaios de laboratório de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade. Ambos os sistemas foram desenvolvidos com solos provenientes de ambiente de clima temperado, portanto, de condições prevalentes bastante distintas daquelas reinantes no ambiente tropical. O ambiente tropical, que se caracteriza por possuir gênese diferenciada, face às ações climáticas. Quando os referidos sistemas de classificação são aplicados aos solos tropicais, normalmente, apresentam resultados insatisfatórios, ambíguos, principalmente, aos solos denominados lateríticos.

A grande extensão de solos lateríticos no território brasileiro, e as limitações dos critérios convencionais de caracterização e classificação de solos tradicionais quando aplicados aos solos tropicais, motivaram os professores e pesquisadores Nogami e Villibor a desenvolver um novo sistema de classificação geotécnica, denominado M.C.T. (Miniatura, Compactado, Tropical).

4.1 Sistemas de Classificações Tradicionais

A identificação e classificação dos solos para os estudos geotécnicos, sejam eles relativos às obras de fundações, barragens, estradas, cortes, aterros, etc., é de fundamental importância.

Os sistemas U.S.C.S. e T.R.B., que são considerados tradicionais no meio técnico, dividem os solos em duas classes principais, os solos grossos e os solos finos, com base na percentagem de material existente na #200. Esses dois sistemas são apresentados nos tópicos que se seguem.

4.1.1 Unified Soil Classification System - U.S.C.S (Sistema Unificado)

Desenvolvido nos Estados Unidos, na Universidade de Harvard, sob a supervisão do Professor Arthur Casagrande, a partir do ano de 1942, o sistema teve como finalidade auxiliar os engenheiros do exército americano na construção de campos de aviação, no período da Segunda Guerra Mundial, sendo revisado, posteriormente, no ano de 1952, com a participação do Bureau de Reclamações Norte Americano e do Corpo de Engenheiros do Exército Americano. O referido sistema é normalizado pela American Society for Testing and Materials - A.S.T.M. Esse sistema baseia-se na identificação dos solos, considerando-se suas propriedades de granulometria e de plasticidade, objetivando agrupar esses materiais de acordo com o seu comportamento em obras de barragens e fundações, extensiva, também, para outras construções. Agrupa os solos em três classes distintas, em função da percentagem passante na #200, sendo solos de granulação grossa, solos de granulação fina e, ainda, os solos orgânicos. Os solos são identificados por duas letras, cuja simbologia representa suas características principais do tipo de solo, acompanhadas de características complementares, a saber: G - Pedregulho; S - Areia; M - Silte; C - Argila; O - Orgânico; Pt - Turfa; W - Bem Graduado; P - Mal Graduado; H - Alta Plasticidade; L - Baixa Plasticidade.

- **Solos grossos** - denominados de pedregulho (G) e areia (S), possuem menos de 50% passante na #200. Podem ser bem graduados (W) ou mal graduados (P), a partir das características definidas pelo Coeficiente de não Uniformidade (C_u) e pelo Coeficiente de Curvatura (C_c). Fazem parte dessa classe os grupos: GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM e SC.

Se os solos grossos apresentam quantidade de finos no intervalo de 5 a 12%, o sistema indica que deve se empregar as duas características secundárias, sejam elas, uniformidade de granulometria e características dos finos. Contudo, se esses solos grossos têm mais de 12 % de finos, importa o conhecimento das propriedades desses finos. Sendo assim, pedregulho e areia serão denominados como siltoso ou argiloso, em que o seu posicionamento na Carta de Plasticidade é primordial à sua devida classificação.

- **Solos finos** - denominados de silte inorgânico (M) e argila inorgânica (C). Quando se tratar de solo fino orgânico (O). O símbolo Pt refere-se ao material turfa, solo altamente orgânico, de cor escura e muito compressível, rico em fibras vegetais e com odor característico. Os solos finos correspondem a 50% ou mais passante na #200. Eles têm, na plasticidade, um componente fundamental para a classificação, sendo separados em função do valor de limite de liquidez, no caso, de limite de liquidez inferior a 50%, denominada baixa plasticidade (L) e, quando o limite de liquidez for superior a 50%, alta plasticidade (H). O comportamento desses solos fica determinado em conjunto, pelo teor de argila e por sua atividade mineralógica. Os solos mais compressíveis possuem maior limite de liquidez. Os solos finos são representados pelos grupos: ML, CL, OL, MH, CH, OH e Pt.

4.1.2 Transportation Research Board - T.R.B.

Essa classificação é empregada na área de pavimentação rodoviária. O atual sistema T.R.B. foi, originalmente, desenvolvido nos Estados Unidos, por Hogentogler e Terzaghi, em 1929, para a aplicação em obras de construções de vias públicas. Posteriormente, revisado no ano de 1945, inclusive com a incorporação do índice de grupo, quando passou a ser denominado de Sistema Highway Research Board - H.R.B. Para fins de classificação considera a granulometria, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o índice de grupo. Esse sistema de classificação de solos é indicado pela American Association of State Highway and Transportation Officials - A.A.S.H.T.O. O sistema T.R.B. também utiliza a percentagem passante na #200 para separar os solos em grossos e finos, porém, considera valor numérico distinto do outro sistema, em relação ao material que passa na #200.

- **Solos grossos** - possuem menos de 35% passante na #200 e são denominados de materiais granulares. Compreendem os grupos de solos identificados por A-1, A-2 e A-3. Os grupos de solos A-1 e A-2 são derivados nos subgrupos: A-1-a e A-1-b e em A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7. Nesses últimos subgrupos oriundos do grupo A-2, os finos apresentam características secundárias e essas são fundamentadas nos limites de consistência para a devida classificação.

- **Solos finos** - possuem 35% ou mais passante na #200 e são denominados de materiais siltosos e argilosos. Compreendem os grupos identificados por A-4, A-5, A-6 e

A-7. O grupo A-7 é derivado nos subgrupos A-7-5 e A-7-6, diferenciados pelas características de plasticidade.

O índice de grupo (IG) tem a finalidade de avaliar, preliminarmente, a qualidade do material como camada de subleito. É determinado em função da percentagem de material que passa na #200, do limite de liquidez e do índice de plasticidade. O referido índice é escrito entre parêntese após a classificação do solo. O índice de grupo 0 indica comportamento como camada de subleito de excelente a bom, enquanto o valor 20 traduz comportamento de regular a mau, por exemplo.

4.2 Sistema de Classificação Alternativa

Devido às limitações dos procedimentos tradicionais de classificação no que se refere aos solos tropicais, apresentam-se a classificação geotécnica M.C.T. (Miniatura, Compactado, Tropical) e a técnica de adsorção de azul de metileno, constituindo-se em métodos alternativos de caracterização e classificação de solos tropicais. Essas limitações dos métodos tradicionais devem-se a peculiaridades dos solos tropicais, que são provenientes de processos intempéricos e/ou pedogenéticos característicos do ambiente tropical. A classificação geotécnica M.C.T. foi concebida considerando-se as limitações dos critérios tradicionais de caracterização e classificação, no tocante aos solos tropicais, destacando-se a granulometria, os limites de consistência, o índice de plasticidade e o índice de grupo, dentre outros. Essa classificação permite distinguir o comportamento laterítico do comportamento não laterítico, possibilitando, dessa forma, a utilização mais racional desses materiais face aos comportamentos diferenciados que essas duas classes de solos tropicais exibem. Os critérios tradicionais adotam faixas granulométricas de máxima densidade, preconizadas pelas condições estabelecidas por Fuller e Talbot. Entretanto, face aos materiais disponíveis nas áreas tropicais úmidas, têm-se constatado, que essas granulometrias se afastam daquelas indicadas nos critérios tidos como tradicionais. Contudo, esses solos tropicais apresentam-se com comportamento satisfatório quando empregados em camadas de sub-bases e de bases de pavimentos, por exemplo. Diversos pesquisadores, destacando-se Nogami e Villibor (1995), que observaram a ocorrência de solos com o mesmo valor de limite de liquidez e de índice de plasticidade se manifestando com expansibilidade completamente diferentes. Ao mesmo tempo em que ocorrem materiais com limite de liquidez elevado (superior a 50%) que não se expandem ou se expandem muito pouco. Esse fato é notado, principalmente, nos solos que se classificam pedologicamente como latossolos e argissolos. Esses materiais são de grande ocorrência no território brasileiro e, que quando tratados pelo sistema de classificação M.C.T. expressam o caráter laterítico. Por outro lado, existem solos que, apesar de possuírem limite de liquidez e índice de plasticidade baixos, manifestam-se com expansibilidade, sendo comum isso ocorrer nos solos saprolíticos ricos em siltes micáceos e/ou caulíníticos.

O índice de grupo, que é um parâmetro utilizado para estimar a capacidade de suporte do solo, é determinado levando-se em consideração os valores de limite de liquidez e a percentagem de solo inferior a #200. Entretanto, estudos recentes revelaram que esse índice se correlaciona bem quando aplicado aos solos provenientes de clima temperado. Para os solos desenvolvidos no ambiente tropical essa correlação se mostra precária, com

grande dispersão, o que sugere a sua inadequabilidade para com os solos tropicais, principalmente, aqueles de comportamento laterítico. Merece destaque a observação reportada por Vargas (1982), mostrando a ambiguidade da Classificação Unificada U.S.C.S. quando aplicada aos solos tropicais.

Como os solos lateríticos e saprolíticos se manifestam comumente em um mesmo perfil de alteração, contudo, possuindo propriedades e comportamentos bem distintos, é recomendável proceder a uma avaliação criteriosa desses materiais para a sua correta aplicação, conforme projeto, visando o bom desempenho desses nas obras.

Em termos conceituais, consideram-se solos lateríticos os solos resultantes de processo pedogenético correspondente a perfis de solos bem drenados e desenvolvidos no ambiente de climas tropicais úmidos. A caulinita é o argilomineral principal. O enriquecimento dessa fração argilosa por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, com macroestrutura e microestrutura porosas, maiormente na fração argila e constituem o horizonte pedológico B desses perfis. Destaca-se que, na ciência do solo, há apenas uma classe correspondente ao solo laterítico, que é denominada de latossolo, que tem confirmado, pela classificação M.C.T., esse aspecto comportamental, conforme reportado anteriormente. Em relação aos solos não lateríticos, ou seja, os solos saprolíticos, esses são resultantes da ação intempérica da rocha em campo, pela desintegração e decomposição, mantendo ainda de maneira nítida, a estrutura da rocha original, sendo, portanto, um solo residual – autóctone, com predominância de argilominerais dos grupos da ilita e montmorilonita. Os solos saprolíticos constituem o horizonte pedológico C e, pela classificação M.C.T., são enquadrados na classe de solos de comportamento não laterítico. Estudos realizados com diversos solos tropicais brasileiros mostraram a significativa correlação entre os resultados obtidos a partir da classificação M.C.T. e a classificação pedológica.

Barroso *et al.* (1998) comentam que os sistemas tradicionais de classificação T.R.B. e U.S.C.S. desenvolvidos para os materiais de ambiente temperado vêm se mostrando inadequados para aplicação em muitos de nossos solos tropicais, pois podem atribuir um mesmo tipo de comportamento a solos lateríticos e saprolíticos, por exemplo.

Outra dificuldade inerente à sistemática convencional, reportada por alguns pesquisadores, refere-se à reprodutibilidade dos ensaios de consistência dos solos lateríticos, visto que há uma tendência de eles mostrarem aumento de plasticidade com o processo de espatulação. É comum notar que os materiais de comportamentos laterítico e não laterítico ocupam, na Carta de Plasticidade, posições similares.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT desenvolveu um Programa Interlaboratorial Brasileiro, compreendendo conceituados laboratórios de mecânica dos solos. Nota-se, a partir da análise da carta de plasticidade, que os resultados obtidos no programa revelaram grande dispersão conduzida pela variação do limite de liquidez e índice de plasticidade, conforme ilustra a Figura 7. Cabe informar que dispersões desses índices também foram constatadas na Grã-Bretanha, conforme Nogami e Villibor (1995).

Com as limitações dos procedimentos convencionais em relação aos solos tropicais, algumas propostas foram tentadas por diversos estudiosos, visando soluções; contudo, elas não tiveram resultados satisfatórios. Com isso, mostra-se a importância do sistema M.C.T. para a identificação de solos tropicais, observando-se que ele pode, ainda, vir a ser aperfeiçoado como qualquer outro sistema de classificação.

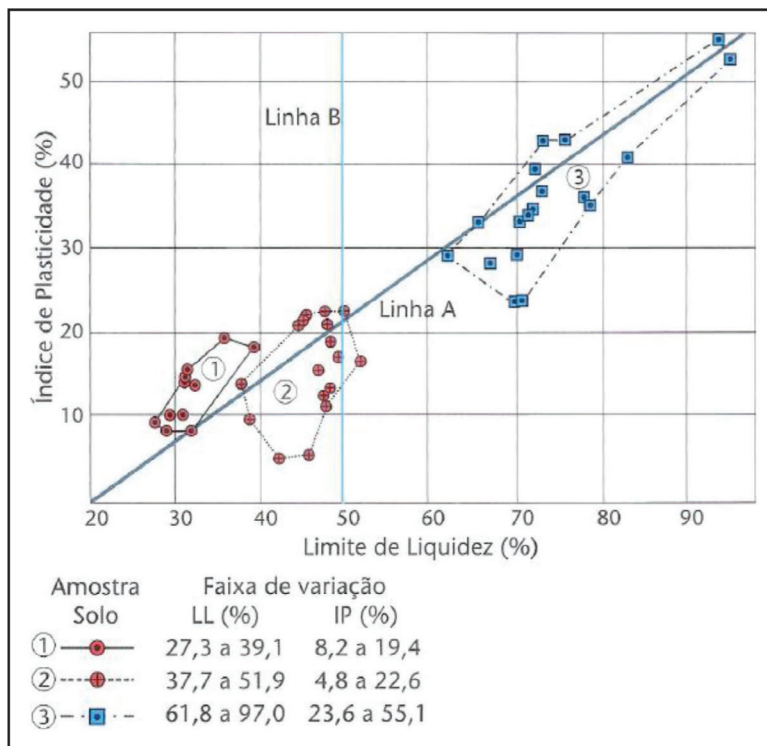


Figura 7 – Carta de Plasticidade do Programa Interlaboratorial (Villibor e Nogami, 2009)

4.2.1 Classificação M.C.T. (Miniatura, Compactado, Tropical)

Segundo Villibor e Nogami (2009), essa sistemática caracteriza-se por utilizar corpos de prova cilíndricos, de dimensões reduzidas, com diâmetro de 50 mm, por isso, designada de miniatura. Os corpos de prova são compactados, mediante procedimento específico e, destinado aos solos tropicais, o que justifica o uso da abreviatura M.C.T. Essa sistemática é recomendada para o estudo de solos tropicais que passam integralmente na #10 (2,00 mm) ou que apresentam pequena fração retida nessa peneira, até 10%. Destaque-se que os solos evoluídos pedologicamente satisfazem essa condição em sua grande maioria, contrastando com a predominância de solos grosseiros no Hemisfério Norte, de onde provêm as classificações tradicionais. Essa classificação veio permitir a verificação do comportamento laterítico ou saprolítico dos solos e dar subsídios à avaliação das propriedades mecânicas e hídricas dos solos típicos dos climas tropicais úmidos. Com a aplicação dessa sistemática foram superados muitos problemas correlacionados aos estudos geotécnicos, pois os sistemas tradicionais de classificação comumente descartam solos reconhecidamente de excelente comportamento, como os denominados lateríticos, classificando-os

como inadequados para a requerida finalidade, resultando muitas vezes em insucesso de projeto, aumento de custos e redução da utilização dos solos apropriados, dentre outros.

Os ensaios do método MCT procuram retratar mais adequadamente as propriedades e os comportamentos geotécnicos, revelando, assim, uma evolução em comparação aos sistemas convencionais que são baseados nos ensaios de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade. Os ensaios de consistência utilizam amostras no estado espatulado, não ocorrendo qualquer controle dessa energia dispendida no manuseio, consequentemente, esse procedimento interfere nos resultados desses ensaios.

O elenco de ensaios para fins classificatório, designado de Mini-M.C.V. e associado, visa verificar se o solo possui ou não o comportamento tecnológico laterítico e, ainda, a previsão de comportamento por meio de propriedades de utilização de maneira hierarquizada. Para obter mais detalhes dos procedimentos de ensaios, consultar Nogami e Villibor (1995) e Villibor e Nogami (2009). Uma síntese dos ensaios classificatórios é apresentada a seguir:

- Ensaio de compactação Mini-M.C.V.

Compactam-se cinco corpos de prova com diferentes teores de umidade e energia variável (2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, n, 4n, 256 golpes), isto é, cada corpo de prova é compactado com um teor de umidade diferente. A compactação é interrompida quando se alcançam os 256 golpes ou a medida de altura entre duas medidas sucessivas for inferior a 0,1 mm. Para os mesmos números de golpes, anotam-se as alturas dos corpos de prova. Dessa forma, produzem-se pares de valores (número de golpes x altura do corpo de prova) para cada corpo de prova. Esses dados permitem obter um gráfico que correlaciona a altura do corpo de prova compactado *versus* o logaritmo do número de golpes para cada um desses teores de umidade. A partir da sistemática de compactação empregada, origina-se uma família de curvas de compactação em decorrência da variação da energia utilizada pela quantidade de golpes aplicada no corpo de prova. Dos gráficos obtidos com esses dados, determinam-se os coeficientes c' e d' .

A curva de compactação ($p_d \times w$) de todos os pontos com energia igual a 12 golpes forma uma linha equivalente à curva de compactação do ensaio Proctor Normal. Nessa curva de compactação, determina-se o parâmetro d' . O coeficiente d' é a inclinação do trecho retilíneo do ramo seco dessa curva de compactação com 12 golpes.

O coeficiente c' é o coeficiente angular do trecho reto das curvas de deformabilidade. A determinação do coeficiente c' é feita a partir das curvas de deformabilidade de cada uma das 5 amostras de solo com umidades diferentes (a_n *versus* $\log N$ golpes), em que a_n é a diferença de altura entre A_n e A_{4n} . Nesse gráfico, obtém-se, para cada teor de umidade, a intersecção da linha de $a=2$ mm (variação de altura entre dois corpos de prova) com a curva de deformabilidade, um valor de N (número de golpes). O valor de Mini-MCV é dado pela Equação:

$$\text{Mini-MCV} = 10 \cdot \log N \quad (\text{Eq. 19})$$

A inclinação desse trecho reto é obtida pela Equação 20. Em cada curva de deformabilidade, será determinado um valor de Mini-MCV com o respectivo valor de c' . O valor

de c' é determinado sempre com referência ao $N = 10$. Os valores são, em geral, muito próximos para toda as curvas.

$$c' = \frac{\Delta a_n}{\Delta \text{mini-MCV}} \quad (\text{Eq. 20})$$

ou de outra forma:

$$c' = \frac{(a_{(N10 \text{ golpes})} - 2)}{[(10 * \log 10) - (10 * \log N_{(2mm)})]}$$

- Ensaio de perda de massa por imersão em água - P_i

O ensaio consiste em deixar imerso em água, por um período de 24 horas, os corpos de prova compactados mediante procedimento descrito anteriormente, em posição horizontal, com um centímetro de solo compactado extrudado para fora do molde de compactação. A massa eventualmente despreendida é recolhida em recipiente próprio para determinação de sua massa seca e condução de cálculo da perda de massa por imersão. O valor de P_i é dado pela Equação 21.

$$P_i = 100 * \left(\frac{M_s}{M_o} \right) \quad (\text{Eq. 21})$$

Sendo:

P_i = % de massa de solo seco despreendida da amostra

M_s = massa de solo seco despreendida da amostra

M_o = massa de solo seco correspondente a 10 mm da amostra de solo compactado

O valor de P_i usado para a classificação é aquele que corresponde ao mini-MCV igual a 10 ou mini-MCV igual a 15, a depender da altura final do corpo de prova. Esse valor é obtido em um gráfico no qual se mostram os valores de mini-MCV nas abcissas e os de P_i nas ordenadas. A união desses pontos forma uma linha. Nota-se que o valor de P_i que deve ser empregado para fins de classificação geotécnica é obtido por interpolação gráfica, observando que para altura final do corpo de prova igual ou maior que 48 mm se adota o valor de mini-MCV igual a 10 e para altura do corpo de prova final menor que 48 mm o valor de mini-MCV a ser adotado será 15. Um fator de correção igual a 0,5 deve ser aplicado na equação 21, toda vez que a massa despreendida de solo se manifestar na forma de monobloco.

Com esses três parâmetros obtidos (c' , d' e P_i), determina-se o coeficiente e' com o emprego de equação para classificar o solo em estudo. O valor de e' pode ser obtido pela Equação 22:

$$e' = \left[\left(\frac{20}{d'} \right) + \left(\frac{P_i}{100} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 22})$$

Os solos de comportamento laterítico - L, compreendem os materiais que constituem o horizonte pedológico - B; tem-se os grupos: LA (areias com pouco finos de comportamento laterítico); LA' (arenosos com finos de comportamento laterítico) e LG' (argilosos e argilas arenosas com finos de comportamento laterítico). Em termos dos solos de comportamento não laterítico - N, que englobam os materiais correspondentes ao horizonte pedológico C, há os grupos NA (areias com grãos de quartzo e/ou mica praticamente não possuem finos); NA' (areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico); NS' (siltes arenosos com finos de comportamento não laterítico) e NG' (argilas arenosas, argilas siltosas e siltes argilosos de comportamento não laterítico). O coeficiente c' correlaciona-se com a granulometria do solo, enquanto o coeficiente e' indica o comportamento laterítico ou não, sendo que o comportamento laterítico começa a se manifestar quando o coeficiente d' se apresenta maior que 20 e com P_i menor que 100. A Figura 8 apresenta o gráfico da classificação geotécnica M.C.T., indicando os três grupos correspondentes aos solos de comportamento laterítico - L (LA, LA' e LG') e os quatro grupos de solos de comportamento saprolítico - N (NA, NA' NS' e NG').

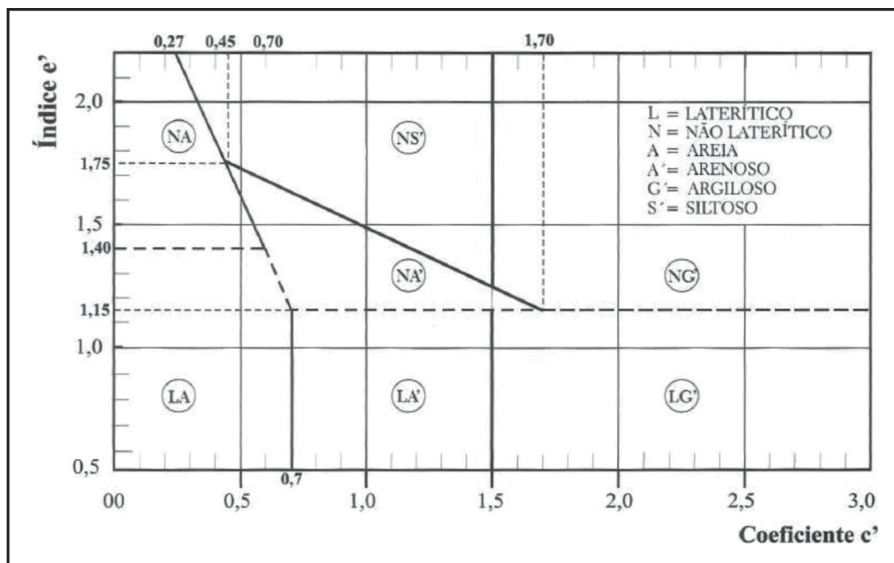


Figura 8 – Gráfico da classificação M.C.T (Villibor e Nogami, 2009)

- Método das Pastilhas

Segundo Nogami e Villibor (1996), o procedimento das pastilhas baseia-se na correlação existente entre: 1) o coeficiente c' , obtido na curva de deformabilidade do solo no ensaio de compactação Mini-MCV, com a contração diametral de corpos de prova (pastilhas) moldadas de pasta de solo preparadas de maneira padronizada e, em seguida, secas; 2) do índice e' da classificação MCT, com a consistência (penetração) das pastilhas inicialmente secas e, em seguida, submetidas à infiltração capilar d'água.

De forma resumida, conforme Villibor e Nogami (2009), o procedimento de ensaio consiste em moldar pastilhas de solo em estado pastoso e com consistência padronizada, sendo utilizada para essa finalidade a fração de solo que passa na peneira de abertura nominal de 0,42 mm. Por meio dessas pastilhas, obtêm-se os valores de contração diametral e de consistência. Para a obtenção do estado pastoso, coloca-se a amostra de solo sobre a face esmerilhada da placa de vidro, acrescenta-se água destilada, visando a uma espatulação eficiente. A seguir, determina-se a consistência da pasta utilizando-se de um mini-penetrômetro e ajusta-se o teor de umidade da pasta até se conseguir uma penetração de 1 mm. Moldam-se três pastilhas em anéis de 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura. Posteriormente, essas pastilhas são submetidas à secagem à baixa temperatura, aproximadamente 50° C, em estufa ou ao ar. Após secagem, é determinada a contração diametral (C_d) de cada uma delas com o auxílio de paquímetro. O próximo passo é submeter as pastilhas à embebição de água, por capilaridade. A pastilha assim tratada é submetida ao minipenetrômetro. O valor da consistência é obtido pela penetração (p) nas pastilhas. O grupo da classificação MCT é obtido conforme o Quadro 1, proposto por Nogami e Villibor (1994):

Quadro 1 – Grupos da classificação MCT

Coeficiente c'	Penetração p (mm)	Grupo MCT
$\leq 0,5$	$\leq 3,0$ 3,1 a 3,9 $\geq 4,0$	LA NA NA/NS'
0,6 a 0,9	$\leq 2,0$ 2,1 a 3,9 $\geq 4,0$	LA - LA' NA'/NS' NS'/NA'
1,0 a 1,3	$\leq 2,0$ 2,1 a 3,9 $\geq 4,0$	LA' NA'/NS' NS'/NA'
1,4 a 1,7	$\leq 2,0$ 2,1 a 3,9 $\geq 4,0$	LA' - LG' NA'/NG' - NS' NS' - NG'
$\geq 1,8$	$\leq 2,0$ 2,1 a 3,9 $\geq 4,0$	LG' NG' NG'

Para a obtenção do coeficiente c' a ser empregado no Quadro 1, utilizam-se as expressões que se seguem, de acordo com o valor obtido previamente para a contração diametral (C_d). Quando a contração diametral estiver compreendida no intervalo entre $0,1 \leq C_d \leq 0,5$ mm, utiliza-se a expressão:

$$c' = \frac{[1 + \log_{10} C_d]}{0,904} \quad (\text{Eq. 23})$$

Quando a contração diametral apresentar valor igual ou maior que 0,6 mm, utiliza-se a expressão:

$$c' = \frac{[0,7 + \log_{10} C_d]}{0,500} \quad (\text{Eq. 24})$$

4.2.2 Técnica de Adsorção de Azul de Metileno

Uma alternativa promissora de classificar os solos tropicais é a técnica de adsorção de azul de metileno, muito difundida na França, mas ainda pouco utilizada em nosso meio técnico.

Segundo o Merck e Co. (1952), o corante denominado de azul de metileno possui a nomenclatura cloridrato de metiltiamina, de composição química $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$. Caracteriza-se como um corante catiônico, ou seja, em solução aquosa, apresenta-se dissociado em ânions cloreto e cátions azul de metileno.

Em 1977, Lan, do Laboratories des Ponts et Chaussées, considerou promissor o ensaio de mancha do azul de metileno para a caracterização de solos. A partir desse trabalho inicial, as pesquisas evoluíram e culminaram com a fixação de um procedimento de ensaio. Essa técnica possibilita a obtenção de informações acerca da atividade da fração argila, complementada por propriedades da capacidade de troca de cátions e de área específica, de maneira eficiente, rápida e a baixo custo.

Diversos pesquisadores aplicaram essa técnica para alguns solos tropicais brasileiros, destacando-se os trabalhos pioneiros de Casanova (1986), tratando da determinação da capacidade de troca catiônica de solos lateríticos; Pejon (1992), na identificação de solos tropicais para finalidade de mapeamento geotécnico; Fabbri (1994), visando a caracterização da fração fina de solos tropicais; Barroso e Fabbri (1996), buscando prever algumas propriedades tecnológicas de solos, e Burgos (1997), no estudo de solos lateríticos e saprolíticos da Cidade de Salvador - BA, dentre outros.

Pesquisas revelaram que a matéria orgânica humificada não absorve ou absorve muito pouco o corante azul de metileno e que os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, muito comuns na fração argila de solos tropicais, também não absorvem esse corante orgânico. Portanto, isso resulta em uma condição bastante positiva, referindo-se apenas que essa adsorção ocorre nos argilominerais, quando o objetivo é justamente aquele de caracterizar a fração argilosa do solo.

O ensaio de adsorção de azul de metileno consiste na determinação, por titulação, do máximo consumo de corante adsorvido pelo solo, o que pode ser verificado pelo aparecimento de uma aura azulada ou esverdeada em torno da borda que envolve o núcleo da mancha, quando se pinga uma gota da suspensão (água + solo + corante) em um papel de filtro. Destacam-se os procedimentos de Pejon (1992) e de Fabbri (1994).

Para a execução do ensaio, a aparelhagem é simples, consistindo em um agitador magnético, uma bureta graduada, um copo Becker de vidro, um bague de vidro, papel filtro para cristais finos, cronômetro, balança, estufa e água destilada. A partir do volume da solução de azul de metileno consumida pelo solo, que significa o pico de máxima adsorção, determinam-se os parâmetros correspondentes. A seguir, apresentam-se, de forma sintética, os referidos procedimentos. Para mais detalhes, consultar os trabalhos originais dos dois autores, supracitados.

- Procedimento de Pejon (1992)

Consiste na determinação dos parâmetros VB – valor de azul de metileno adsorvido pelo solo e Acb – índice de atividade da fração argilosa, fazendo-se uso de uma solução de azul de metileno com concentração de 1,5 gramas por litro de água destilada e empregando-se uma fração de solo com 2 a 4 gramas, que passa na #10 (2,00 mm). Adicionalmente, determina-se a capacidade de troca de cátions e a área específica dos argilominerais.

A Figura 9 ilustra o gráfico de atividade desse procedimento, mostrando a relação entre o índice Acb e a percentagem de argila (0,002 mm), indicando as classes e os correspondentes graus de atividade:

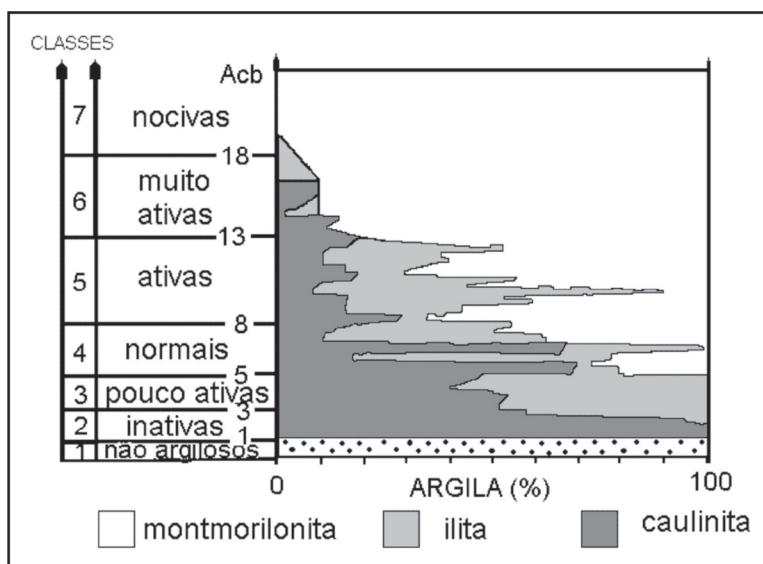


Figura 9 – Gráfico de atividade de Pejon

- Procedimento de Fabbri (1994)

Consiste na determinação dos parâmetros Va - valor de azul de metileno adsorvido pelo solo e CA - coeficiente de atividade da fração argilosa, fazendo-se uso de uma solução de azul de metileno com concentração de 1,0 grama por litro de água destilada e empregando-se uma fração de solo de 1 grama que passa na #200 (0,074 mm).

O referido autor definiu três graus de atividade, a saber: $CA > 80$ (Muito Ativo); $11 < CA < 80$ (Ativo) e $CA < 11$ (Pouco Ativo). Complementarmente, obtém-se, também, a capacidade de troca de cátions e a área específica dos argilominerais.

A Carta de Fabbri (1994), que correlaciona o valor de azul e a percentagem de argila (0,005 mm), é ilustrada na Figura 10 que se segue, mostrando as três regiões de atividade mineralógica em função do coeficiente de atividade:

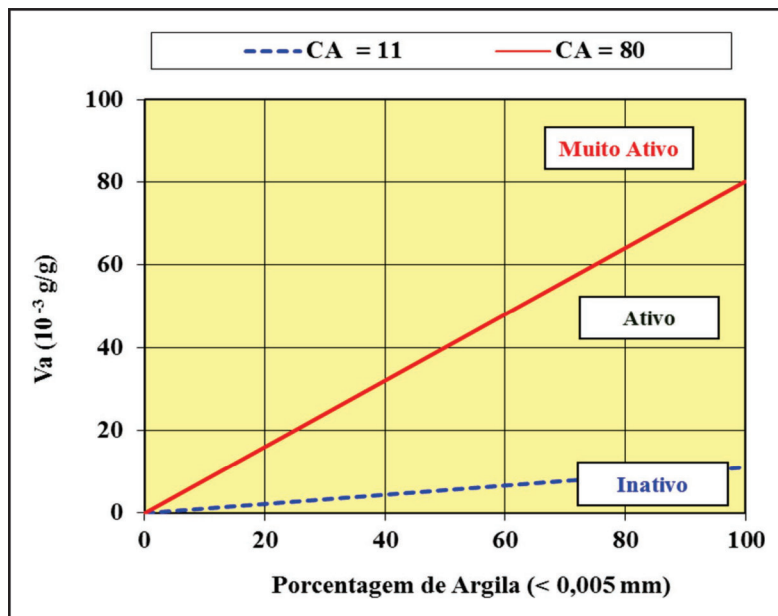


Figura 10 – Carta de atividade de Fabbri

De acordo com Resende *et al.* (1995), a atividade da fração argila refere-se à capacidade de troca de cátions da fração mineral, deduzida a contribuição da matéria orgânica. No critério pedológico, a argila considerada de atividade alta se manifesta com capacidade de troca de cátions (C.T.C.) ≥ 27 cmol/kg. Sendo assim, pode-se determinar o referido parâmetro químico a partir do ensaio de adsorção de azul de metileno, possibilitando realizar essa avaliação mineralógica em conformidade com a ciência do solo, mostrando a importância dessa técnica simples, eficiente e de baixo custo para a identificação da atividade mineralógica.

Foi observada a significativa correlação existente entre a C.T.C. obtida pela técnica de adsorção de azul de metileno e aquela correspondente ao procedimento usualmente empregado na área química, indicando a eficácia dessa técnica alternativa.

Encontra-se, no Quadro 2, um resumo das características de estrutura, área específica e capacidade de troca de cátions dos principais argilominerais de interesse geotécnico, conforme Resende *et al.* (1995):

Quadro 2 – Propriedades básicas de alguns argilominerais

Argilomineral	Estrutura	Área específica (m ² /g)	Capacidade de troca de cátions (cmol/kg)
Caulinita	1:1	10 a 20	3 a 15
Ilita	2:1	70 a 120	10 a 40
Montmorilonita	2:1	700 a 800	60 a 150

Deve-se notar que a técnica de adsorção de azul de metileno permite caracterizar a atividade de solos não plásticos, devido ao seu caráter químico, o que não é possível de se obter por meio dos procedimentos convencionais mediante os ensaios de consistência. Na sistemática convencional os solos com baixa percentagem de finos não permitem a condução dos ensaios de limites de liquidez e de plasticidade, por consequência, esses são identificados como não líquido e não plástico.

Em Pedologia, a fração silte tem sido empregada como indicadora do grau de intemperização do solo, consequentemente, os solos residuais maduros, como os latossolos, que compreendem o horizonte pedológico B, possuem valores muito baixos ou nulos dessa fração mineral. Por outro lado, os solos residuais jovens que constituem o horizonte pedológico C se manifestam de forma oposta, com teor elevado de silte. Wambeke (1962) reporta que, quando a relação silte/argila for inferior de 0,15, o solo é muito intemperizado.

Burgos (1997) comenta que há uma significativa correlação entre a previsão de comportamento, obtida pela classificação M.C.T. e os graus de atividade encontrados pela técnica de adsorção do azul de metileno, observando-se que o primeiro método consiste em ensaios de propriedades mecânicas e hidráulicas, enquanto, o segundo é de caráter químico.

Segundo Camapum de Carvalho (2004), quimicamente, pode-se dizer que a capacidade de troca catiônica é baixa nos solos tropicais profundamente intemperizados (solos lateríticos) e comumente alta, dependendo dos argilominerais presentes nos solos pouco intemperizados (solos saprolíticos). O potencial hidrogeniônico desses solos, em sua grande maioria está compreendido no intervalo de 4,5 a 6,5, e esse parâmetro químico é muito relevante para se entender as propriedades e comportamento de solos argilosos, visto que o pH influencia na agregação de solos lateríticos. Esse fato é também governado pela ação floculante que os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio apresentam. Estudos conduzidos pela ciência do solo indicam a fraca resistência à floculação dos materiais lateríticos, devido aos tipos de íons dominantes quando comparados aos materiais típicos das áreas temperadas, caracterizados pela presença de elementos alcalinos, principalmente, os terrosos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conceito de elemento idealizado de solo não saturado com fase ar contínua, proposto por Fredlund e Rahardjo (1993), foi apresentado juntamente com os diagramas propostos por Fredlund (1978), correspondentes aos modelos rigoroso e simplificado, notando-se a incorporação de uma nova fase denominada interface ar-água, também conhecida como película contrátil.

Como os solos tropicais, principalmente, os lateríticos, apresentam-se com sua fração argila constituída, predominantemente, pelo argilomineral caulinita e por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, recobrimdo ou cimentando o argilomineral, resultam em agregações que possuem microporos e macroporos, que interferem nas propriedades índices e em seu comportamento geotécnico.

Os sistemas convencionais de classificação geotécnica U.S.C.S. e T.R.B., desenvolvidos com base nos solos de ambiente temperado, vêm se mostrando inadequados para aplicação em muitos de nossos solos tropicais, pois podem atribuir um mesmo tipo de comportamento a solos lateríticos e saprolíticos, materiais esses que se apresentam comumente em um mesmo perfil de solo, contudo, possuem propriedades geotécnicas bastante distintas.

A classificação geotécnica M.C.T., desenvolvida com base nos solos tropicais do Brasil, permite distinguir comportamento laterítico ou saprolítico a partir de ensaios de compactação Mini-M.C.V. e perda de massa por imersão em água, mediante a avaliação de propriedades mecânicas e hídricas.

A técnica de adsorção de azul de metileno se revela como uma ferramenta promissora e útil para os estudos de solos tropicais, ao mesmo tempo em que possibilita, de forma rápida, eficiente e a baixo custo, informações acerca da atividade da fração argila dos solos.

REFERÊNCIAS

BARROSO, S.H.A. & FABBRI, G.T.P. (1996). Utilização do ensaio de adsorção de azul de metileno para a previsão de algumas propriedades tecnológicas dos solos XXX Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador, v. 2. p. 472-493.

BARROSO, S.H.A.; SANTANA, J.A. & FABBRI, G.T.P. (1998). Previsão de algumas propriedades geotécnicas de solos finos através de ensaios com solos artificiais. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Brasília, v. I, p. 635-642.

BUENO, B.S. & VILAR, O.M. (1984). Mecânica dos solos volume I, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 131 p.

BURGOS, P.C. (1997). Aplicação da classificação M.C.T. e da técnica de adsorção de azul de metileno a solos da cidade de Salvador - BA. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 183 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2004). Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ABMS, São Carlos, v. II, p. 597-616.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G.F.N. & LEÃO CARVALHO, E.T. (2012). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Faculdade de Tecnologia, Brasília, pp. 156-182.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA JR., G.F.N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks*, Volume 4, N. 3 (Invited Editors: T.M.P. Campos, F.A.M. Marinho, G.F.N. Gitirana Jr.), 25 p.

CASANOVA, F.J. (1986). O ensaio de azul de metileno na caracterização de solos lateríticos. XXI Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, v. II, p. 276-283.

FABBRI, G.T.P. (1994). Caracterização da fração final de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1v.

FREDLUND, D.G. & MORGENSTERN, N.R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(5): 447-466.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soil.

GITIRANA JR., G.F.N.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; FERREIRA, S.R.M. & MASCARENHAS, M.M.A. (2012). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Camapum de Carvalho, J; Gitirana Jr., G.F.N. & Carvalho, E.F.L. (eds), UnB, Faculdade de Tecnologia, Brasília, v. 4, p. 157-182.

GITIRANA JR., G.F.N. & FREDLUND, D.G. (2004). Soil-water characteristic curve equation with independent parameters, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 130(2): 209-212.

JACINTO, E.C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F.B.F. & GUIMARÃES, R.C. (2012). Perfil de intemperismo e infiltração. Camapum de Carvalho, J; Gitirana Jr., G.F.N. & Carvalho, E.F.L. (eds), UnB, Faculdade de Tecnologia, Brasília, v. 4, p. 117-142.

LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. (1969) Soil mechanics. Jonh Wiley & Sons, New York, 553 p.

MERCK e CO. (1952). The merck index of chemical and drugs. Rahway, Merck e Co, Inco.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1994). Identificação expedita dos grupos da classificação M.C.T. para solos tropicais. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Foz do Iguaçu, v. 4, p. 1293-1300.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1996). Importância e determinação do grau de laterização em geologia de engenharia. 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, V.1, pp. 345-358.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1995). Pavimentação de baixo custo com solos laterítico. Villibor, São Paulo, 240 p.

NOGUEIRA, J.B. (1988). Mecânica dos solos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 197 p.

PEJON, O.J. (1992). Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba (Escala 1:100.00) - estudos de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2v.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. (1995). Pedologia: base para distinção de ambientes. Neput, Viçosa, 304 p.

SKEMPTON, A.W. (1953). The colloidal activity of clays. International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, v. 1, p. 57-61.

VARGAS, M. (1982). O uso dos limites de Atterberg na classificação de solos tropicais. VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Olinda, Recife, v. V, p. 262-278.

VILLIBOR, D.F. & NOGAMI, J.S. (2009). Pavimentos econômicos: tecnologia do uso de solos finos laterítico. Arte & Ciência, São Paulo, 292 p.

WAMBEKE, V. (1962). Criteria for classifying tropical soil by age. Journal Soil Science, 13: 124-132.