

Capítulo 12

COMPACTAÇÃO DOS SOLOS: LABORATÓRIO E CAMPO

Lúcio Flávio de Souza Villar
Renato Cabral Guimarães
John Kennedy Guedes Rodrigues
Roberto Francisco de Azevedo
José Camapum de Carvalho

1. INTRODUÇÃO

Muitas obras de engenharia, tais como barragens, muros de arrimo, estradas e aeroportos, utilizam solos compactados, e compactar um solo significa torná-lo um material mais denso em relação ao seu estado de deposição no local da obra onde será usado e com comportamento mais adequado para os propósitos a que se destinam. O estado mais denso é obtido por meio da redução do volume de ar intersticial, com pequena ou nenhuma variação do teor de umidade do solo. A compactação pode ser feita em superfície ou em profundidade, utilizando solicitações estáticas, impacto e/ou vibração, por meio de equipamentos manuais ou mecânicos, em laboratório ou no campo. A principal diferença desse processo para o de adensamento de solos saturados é que este último envolve a expulsão de água dos vazios a uma velocidade geralmente pequena, enquanto a compactação, por ser realizada sobre um solo não saturado, envolve a expulsão de ar e o processo é, geralmente, rápido. Fernandes (1994) define a compactação como o processo pelo qual uma massa de solo constituída por partículas sólidas, água e ar tem o seu índice de vazios diminuído devido a uma redução do volume da sua fase gasosa em consequência da aplicação de cargas com o objetivo básico de obter um novo material com um comportamento mais adequado para a aplicação a que se destina.

Segundo Ribeiro (2008), a necessidade de construção de estradas interurbanas contribuiu em muito para o desenvolvimento de teorias e conhecimentos sobre processos de compactação de solos. Os romanos, que construíram uma extensa rede de estradas, já se preocupavam em misturar solos para obter um melhor comportamento mecânico e já aplicavam técnicas de compactação. Especialmente no século XVIII, devido ao movimento comercial e militar intenso na Europa, novos métodos e técnicas construtivas e de compactação foram desenvolvidos e testados. No século XIX, surgiram, na França, os primei-

ros rolos puxados a cavalo para a compactação de estradas, que se desenvolveram, mais tarde, para rolos puxados por máquinas a vapor (Ribeiro, 2008).

A construção de represas e pequenas barragens também colaborou muito para o desenvolvimento de técnicas de compactação e para o conhecimento do comportamento dos solos compactados. De acordo com Ribeiro (2008), foi o fato de que, no início do século XIX, utilizavam-se bovinos e ovinos para comprimir as estruturas do aterro para funcionar como represa que levou ao desenvolvimento do cilindro pés de carneiro. Esse tipo de equipamento teve seu maior desenvolvimento na primeira metade do século XX, juntamente com as técnicas de compactação vibratórias e dinâmicas, que foram desenvolvidas na Alemanha durante os anos 30. Durante as grandes guerras mundiais, houve forte avanço na tecnologia de compactação de solos, sendo que, após esses conflitos, houve maior impulso na técnica de compactação por vibração, que, antes, era utilizada apenas para solos não coesivos, mas que, hoje em dia, são também utilizados para compactação de materiais coesivos e betuminosos, sendo que, no caso dos solos argilosos, o tema requer maior reflexão.

Neste capítulo, será apresentada uma visão geral sobre solos compactados envolvendo as técnicas de compactação mais usualmente adotadas em laboratório e no campo. Aspectos concernentes ao comportamento dos solos compactados, tais como deformabilidade e resistência, não serão objeto deste capítulo, mas sim como a compactação pode afetá-los. Muitas vezes, o comportamento de um solo é atribuído à técnica, energia ou umidade de compactação, quando, na verdade, os responsáveis pelo comportamento são a natureza químico-mineralógica do solo e as peculiaridades estruturais próprias, além de outras que lhe foram conferidas pela compactação.

2. COMPACTAÇÃO E SOLOS COMPACTADOS

2.1 Teoria da compactação

O artigo publicado por Proctor (1933) é um dos primeiros trabalhos sobre a compactação de aterros, conferindo técnica a algo que, antes, era realizado quase empiricamente. Este autor desenvolveu um ensaio dinâmico para a determinação experimental da curva de compactação, representada pela relação peso específico aparente seco (γ_d) com o teor de umidade gravimétrico do solo (w). A Figura 1, resultante desse ensaio, mostra que o peso específico aparente seco do solo é menor ou maior de acordo com o teor de umidade em que se encontra esse solo quando da compactação a uma dada energia, ou seja, a eficiência da compactação do solo, quando se aplica uma dada energia, depende do teor de umidade. Segundo Proctor (1933), para o ramo ascendente da curva, ramo seco, à medida que o teor de umidade vai aumentando, a água lubrifica as partículas de solo, reduzindo o atrito grão a grão. Porém, a partir de um determinado teor de umidade, a água impediria a expulsão do ar dos vazios, isto é, com um teor de umidade mais elevado, o ar presente em alguns dos vazios do solo não mais estaria interconectado com o ar presente em outros vazios desse solo, condição chamada de ar ocluso, e as cargas de compactação aplicadas não mais conseguiriam influenciar no rearranjo das partículas do solo, não havendo mais,

portanto, acréscimos de peso específico. Assim, no ramo descendente da curva mostrada na Figura 1, ramo úmido, a água impediria a expulsão do ar, começando mesmo a ter mais água do que sólidos no interior do solo, o que leva os pesos específicos ou massas específicas a diminuírem à medida que os teores de umidade aumentam.

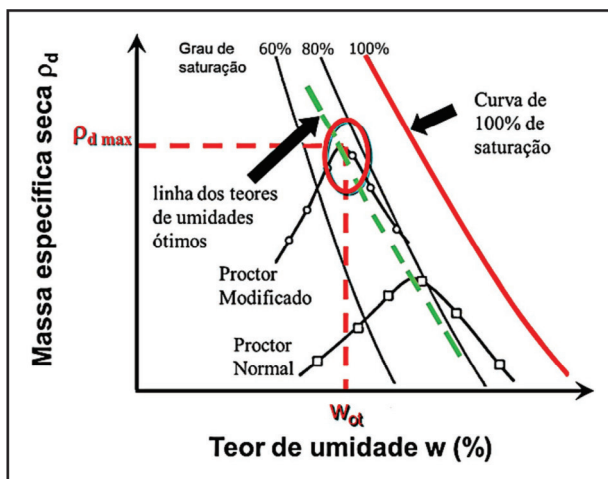


Figura 1 – Curva de compactação destacando a massa específica seca máxima, o teor de umidade ótimo e a curva de 100% de saturação (adaptada de Das, 2006)

No ponto de inflexão da curva apresentada na Figura 1, é determinado o teor de umidade ótimo (w_{ot}), correspondente à massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d\max}$) ou ao peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\max}$), conforme as unidades consideradas. Esse resultado indica que aquela é a relação ideal entre as quantidades de partículas de solo, água e ar para obter o melhor resultado em termos de densificação para aquela energia de compactação aplicada naquele tipo de solo sem que, no entanto, corresponda, necessariamente, ao melhor comportamento para o parâmetro analisado. Esses valores constituem parâmetros característicos do solo somente para aquela energia de compactação e para aquelas condições de ensaio. A curva mais à direita no gráfico mostrado na Figura 1 representa a relação entre a massa específica seca e o teor de umidade para o solo saturado ($S_r = 100\%$), ou seja, quando não existir mais ar presente nos vazios do solo. Essa condição, em geral, não pode ser alcançada pela compactação. Na apresentação dos resultados, é comum serem traçadas as outras linhas correspondentes aos outros graus de saturação, as quais também podem ser vistas na Figura 1, que mostra, ainda, a diferença nos resultados devido à energia de compactação utilizada. Em geral, quanto maior a energia de compactação em um mesmo tipo de solo, maior o peso específico aparente seco obtido e menor o teor de umidade ótimo. A linha tracejada representada na Figura 1 corresponde ao lugar geométrico dos pontos de teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima desse solo, e sua posição também varia com a energia de compactação e o tipo de solo. Sua posição tende a ser, aproximadamente, paralela à linha de saturação.

2.2 Interação entre partículas no processo de compactação

Além de Proctor (1933), outros autores, tais como Hogentogler (1937), Hilf (1956), Lambe (1958), Olson (1963), Barden & Sides (1970), estudaram o comportamento do solo quando submetido à compactação. Eles buscaram justificar o formato da curva de compactação de um solo (Figura 1) em função de variáveis como capilaridade, permeabilidade, viscosidade da água e tensões efetivas.

De acordo com Hogentogler (1937), a forma da curva de compactação reflete quatro estágios de umidade relacionados à viscosidade da água: hidratação, lubrificação, inchamento e saturação do solo. Isso está representado na Figura 2, que é composta por quatro trechos lineares, cada um deles indicando os estágios previamente mencionados. Na fase de hidratação, com o aumento da umidade, a água é adsorvida pelas partículas, formando uma fina película. Isso seria acompanhado por uma redução na viscosidade da água, que diminuiria o atrito entre os grãos, permitindo que as partículas se arranjam mais facilmente, aumentando, dessa forma, o peso específico do solo. A partir de certa umidade, a camada de água superficial não só reduziria o atrito entre os grãos, mas passaria a atuar como lubrificante, fase de lubrificação, facilitando ainda mais a ocorrência de novos arranjos das partículas durante a compactação, permitindo que o solo se torne mais denso, mas ainda não saturado. Já na fase de inchamento, a umidade do solo está acima do teor de umidade ótimo, o que levaria a um aumento no volume de solo, mas sem redução do volume de ar, justificando a diminuição do peso específico aparente seco nesse trecho. No último estágio, a fase de saturação, a curva de compactação se aproxima da curva de $S_r = 100\%$, todo o ar é expelido do solo, e a presença da água preenchendo os poros não permite que os grãos consigam novos arranjos que levem a um aumento de densidade.

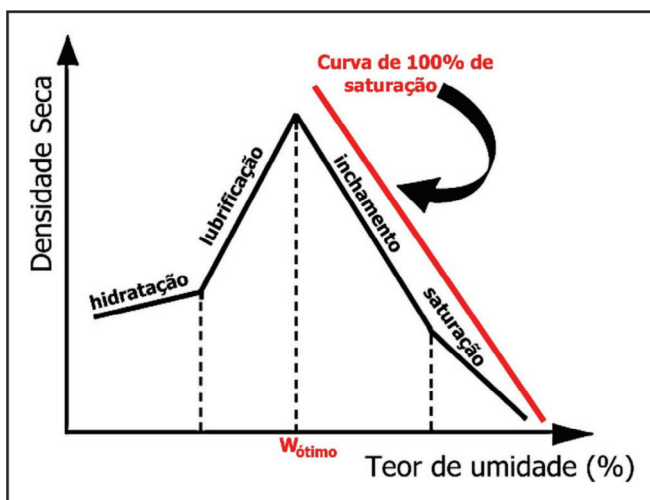


Figura 2 – Teoria de Hogentogler (1937) para explicar a forma da curva de compactação (adaptado de Hogentogler, 1937)

Lambe (1958) afirma que a forma da curva de compactação de um solo argiloso é justificada pela química coloidal das partículas de argilominerais presentes no solo (Figura 3). Ele indica que a interação entre dois coloides (tamanho dos argilominerais) é função das forças externas a que se submetem, das forças de contato entre eles, das forças de atração e das forças de repulsão. Uma discussão mais detalhada sobre a atuação dessas forças entre partículas é apresentada por, dentre outros, Camapum de Carvalho *et al.* (1987).

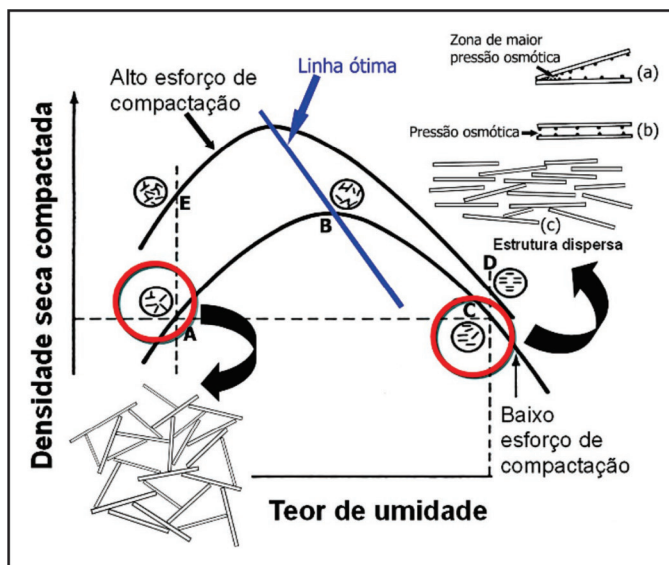


Figura 3 – Teoria de Lambe (1958a) para explicar a forma da curva de compactação (modificado de Lambe, 1958)

A teoria proposta por Lambe (1958) para explicar a curva de compactação se fundamenta no fato de que, para teor de umidade baixo do solo, não se desenvolveria a camada dupla de íons ao redor de cada partícula, resultando em uma concentração de eletrólitos relativamente alta e em uma redução das forças de repulsão entre essas partículas. Por esse motivo, haveria, como consequência, uma tendência à floculação dos grãos de solo no tamanho de coloides, resultando em um solo pouco denso. Isso aconteceria na região do ponto A, mostrado na Figura 3. Quando são utilizadas energias de compactação elevadas, há, por força da energia externa aplicada, uma diminuição da distância entre os argilominerais, elevando a densidade (ponto E). Para uma mesma energia de compactação, à medida que o teor de umidade aumenta, ocorre uma expansão da camada dupla e a redução dessa tendência de floculação, permitindo um rearranjo mais ordenado das partículas, levando o solo a atingir densidades mais altas, tal como mostrado no ponto B. Quando o teor de umidade aumenta ainda mais, a concentração eletrolítica é reduzida, o que aumenta a repulsão entre as partículas, levando a estrutura do solo argiloso a se tornar dispersa, ou seja, com as partículas coloidais tendendo a ficarem paralelas entre si, como mostra o ponto C. No ramo úmido, onde a umidade está acima da ótima, o aumento da energia de

compactação produz o efeito de alinhar as partículas, mas sem diminuir as distâncias entre elas, como aconteceu no ramo seco, conforme ilustra o ponto D.

Observa-se que essas teorias apresentam os mecanismos do processo de densificação de solos constituídos por partículas individualizadas, ou seja, a densificação, ocorrendo com a redução da distância entre as partículas. Nessas teorias, os fenômenos relacionados à interação solo-água e como ela interfere no processo de compactação estão associadas à natureza químico-mineralógica das partículas individualizadas, e ambas as teorias ajudam a entender os mecanismos que levam à densificação dos solos argilosos nessas circunstâncias. No entanto, nos perfis de intemperismo presentes em regiões tropicais, essa condição de partículas individualizadas presentes no solo e em condições de serem orientadas só se faz presente em solos pouco intemperizados, solos saprolíticos. Nos solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, as partículas de argila encontram-se, em sua maioria, compondo agregados e sem a liberdade necessária para terem sua orientação influenciada pelo processo de compactação e nem sua condição de hidratação influenciando nesse processo, tornando-se relevante analisar a curva de compactação à luz da teoria dos solos não saturados, teoria que permite, ainda, o entendimento da curva de compactação para os demais tipos de solo.

Outro aspecto relevante a ser destacado diz respeito aos solos pouco intemperizados quando neles se fazem presentes argilominerais expansivos. Nesse caso, a umidade e volume totais do solo não correspondem às situações de porosidade e umidade intituladas, por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021), como efetivas, e que guardam uma relação direta com as propriedades e os comportamentos do solo. Segundo esses autores, enquanto o índice de vazios (e) e o teor de umidade (w) são baseados no peso e volume de sólidos secos a 105°C, o índice de vazios efetivo (e') e o teor de umidade efetivo (w') deveriam ser considerados para solos com a presença de agregados formados pelas suas partículas menores em sua constituição. Nesse caso, somente os vazios e teor de umidade entre os agregados deveriam ser considerados, que seriam o e' e o w' . Dependendo do teor de umidade e nível de sucção presente, esses agregados poderiam ser assumidos como saturados e, nesse caso, a água contida neles poderia ser incorporada no peso e volume dos sólidos, enquanto que, para o caso da presença de minerais argílicos expansivos, o volume dos vazios e teor de umidade associados à sua hidratação devem ser excluídos, assim, reduzindo suas densidades (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr., 2021).

2.3 Curva de compactação à luz da teoria dos solos não saturados

Complementarmente às explicações até aqui apresentadas, torna-se relevante buscar entender a compactação dos solos considerando-se a influência do estado de não saturação em que ele se encontra. Para explicar a forma da curva de compactação com fundamento na teoria dos solos não saturados, recorrer-se-á à própria Figura 3 e às curvas características de retenção de água mostradas na Figura 4. Na Figura 3, qualquer que seja o solo, do ponto A até o ponto B, a fase ar mantém-se contínua e perde a continuidade a partir do ponto B, passando à condição de bolhas de ar oclusas. Na Figura 4, para a curva característica de retenção de água da areia, devido à baixa atividade superficial, o fenômeno de interação água-ar-mineral é predominantemente de natureza física, ou seja, trata-se

do fenômeno capilar. Tem-se, ainda, que, devido à baixa atividade superficial do mineral quartzo, a água poderá, nesse caso, exercer efeito lubrificante. Logo, compactando-se o solo no ponto A (ver Figura 3) com uma determinada energia externa, a maior capilaridade, que é uma energia interna resistente, e o menor efeito lubrificante diante da energia de compactação farão com que o peso específico obtido seja pequeno. Com o aumento do teor de umidade de compactação, a capilaridade diminui (Figura 4) e, conjuntamente, amplia-se o efeito lubrificante da água, reduzindo, assim, a resistência do solo à energia externa de compactação, fazendo com que aumente o peso específico aparente seco até atingir o ponto B (ver Figura 3). A partir do ponto B, a fase ar torna-se descontínua, reduzindo a permeabilidade do solo e fazendo, assim, com que gere poropressão (também chamada de “pressão neutra” ou “pressão intersticial”, mas optou-se por poropressão neste capítulo) positiva, o que reduz a energia efetiva externa de compactação. Como a fase ar é compressível, diminuindo o seu volume à medida que aumenta o teor de umidade, reduz-se a compressibilidade do fluido ar-água, potencializando o aumento das poropressões positivas quando se aplica a energia de compactação ao solo, o que resulta no ramo úmido, trecho BC (ver a Figura 3), descendente. Sendo esses solos marcados por partículas de forma mais equidimensionais, não há que se pensar em orientação ou não de partículas, lembrando que a abordagem de Lambe (1958), resumida na Figura 3, refere-se aos solos argilosos com partículas não agregadas.

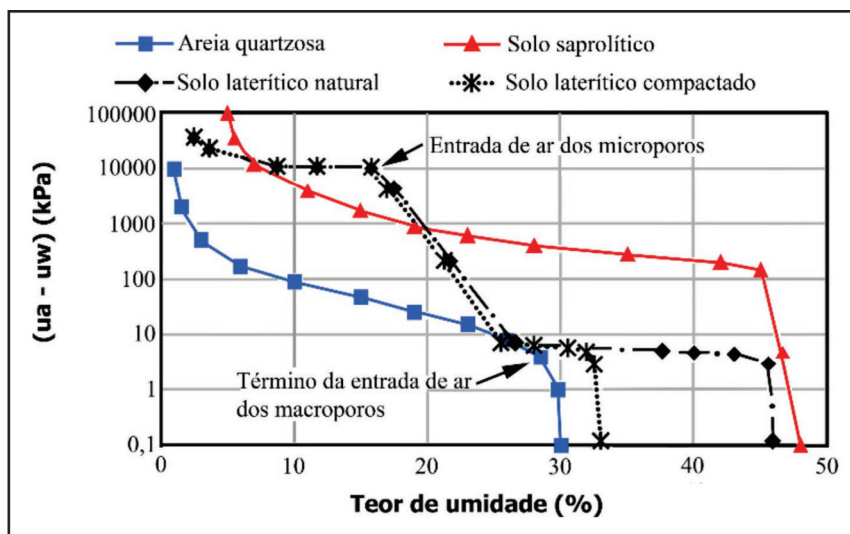


Figura 4 – Curvas características de retenção de água (modificada por Camapum de Carvalho *et al.*, 2015)

O que muda no entendimento da curva de compactação com base na teoria dos solos não saturados ao passar da areia quartzosa para o solo saprolítico é o fato de que, agora, sendo relevante a atividade do solo devido à energia de superfície, o fenômeno deixa de ser de natureza puramente física (capilaridade), passando a ser de natureza físico-química

(sucção devido às forças de adsorção e capilaridade), nela intervindo a mineralogia e a química do solo. No caso dos solos saprolíticos, o efeito lubrificante da água é desprezível em relação aos demais fatores intervenientes no processo de compactação. Os solos saprolíticos, sendo eles constituídos por partículas lamelares, fará com que essas partículas se organizem em função da umidade e da energia de compactação segundo a teoria de Lambe (1958), cabendo, no entanto, a observação de que, se elas estiverem organizadas em pacotes, e lembrando que pacotes não são agregados, a orientação delas com o aumento do teor de umidade e da energia de compactação é dificultada. Faz-se necessário, ainda, destacar que, caso o solo saprolítico contenha argilomineral expansivo, a secagem prévia gerará, devido à desidratação desses argilominerais, diferenças na umidade ótima e no peso específico aparente seco em relação ao campo, situação em que o solo não se submete à secagem. Essa desidratação afeta, também, o peso específico dos grãos, aumentando-o. Torna-se recomendável, para esses solos, que se trabalhe com os conceitos de umidade e porosidade efetivos, conforme preconizado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021).

Passando aos solos lateríticos, que são solos profundamente intemperizados, constituídos de agregados (Figura 5), tem-se uma situação diferenciada em relação aos dois solos anteriormente discutidos, pois, nesse caso, não são grãos de areia pouco ativa nem o teor de argila com partículas individualizadas obtidas com o uso de defloculante ou ultrassom que comandará a eficiência da compactação, mas, sim, a macroporosidade e a água que ocupa os macroporos existentes entre os agregados. Esses solos são constituídos de agregados que possuem microporos em seu interior e macroporos entre eles, conforme mostrado na Figura 5. Na região de macroporos, a sucção/capilaridade é pequena e interfere pouco no processo de compactação e, na zona de microporos, como eles se encontram no interior dos agregados, eles terminam não sendo afetados nem interferindo no processo de compactação (Farias *et al.*, 2011). Com a compactação, ocorre o fechamento dos macroporos e, em certos casos, também dos mesoporos.

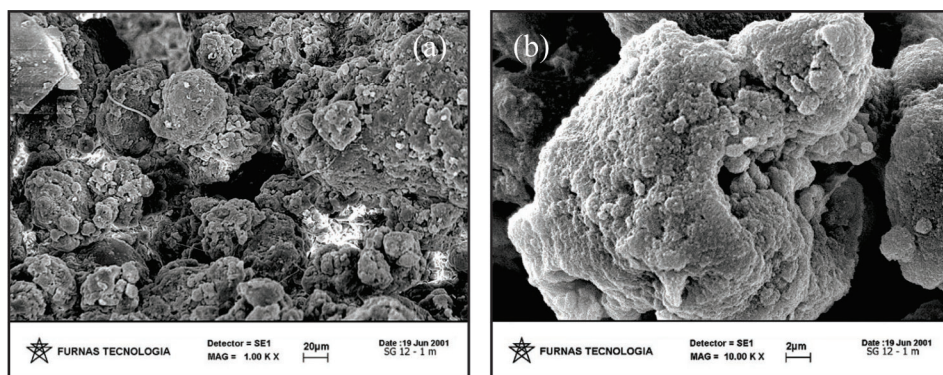


Figura 5 – Microestrutura de um solo laterítico coletado a 1 m de profundidade:
a) aumento de 1.000 vezes evidenciando presença de macroporos entre agregados;
b) aumento de 10.000 vezes evidenciando microporos em agregado (imagens de J. Camapum de Carvalho)

Na compactação, interfere a sucção/capilaridade de modo mais marcante na faixa compreendida entre o término da entrada de ar nos macroporos (Figura 4) e a entrada de ar nos microporos, sendo que, com o aumento da umidade, diminui a resistência interna à energia externa de compactação até atingir a umidade ótima, umidade em que ocorre a oclusão da fase ar. Nesses solos, a secagem prévia conduz a fase ar ao interior dos agregados, podendo ocasionar duas consequências: diminuição da umidade ótima em relação ao campo, e, sendo os agregados pouco estáveis, a entrada de água devido ao umedecimento pode, ao colocar a fase ar sob pressão, conduzir à destruição dos agregados, gerando, assim, uma matriz mais fina no solo, o que interfere no resultado da compactação. Quando da secagem do solo por aquecimento, um terceiro fator poderá interferir no resultado da compactação: o surgimento de microfissuras nos agregados formados por diferentes minerais que, geralmente, apresentarem coeficientes de dilatação térmica distintos, comprometendo, assim, a estabilidade textural, que pode gerar alteração granulométrica com o processo de compactação. A desagregação desses solos pode provocar um aumento do peso específico aparente seco e uma redução da umidade, porém, com uma piora no comportamento mecânico devido à matriz mais fina dos grãos (Guimarães *et al.*, 1997).

Ainda sobre os solos lateríticos, cabe um destaque. Quando esses solos apresentam haloisita hidratada (haloisita $4H_2O$), a secagem do solo na fase de preparação para o ensaio de compactação, geralmente, provoca um desvio de umidade em relação ao campo, pois lá o solo só será seco na fase de determinação da umidade, o que conduzirá a valores mais elevados *in situ*. Como a desidratação também afeta a densidade real dessa haloisita, haverá um impacto no peso específico aparente seco, que, em princípio, será maior no campo.

Portanto, este item mostrou que a teoria dos solos não saturados permite ampliar o entendimento da curva de compactação dos solos. Além disso, foi mostrado que é relevante conhecer particularidade dos solos, como textura, química e mineralogia.

2.4 Exemplos de interferência da compactação no comportamento dos solos

A literatura, de um modo geral, traz a informação de que um solo argiloso compactado no ramo seco é mais colapsível que esse mesmo solo compactado na mesma densidade no ramo úmido (por exemplo, em Han & Vanapalli, 2016, e em Dias Neto, 2020). Em primeiro lugar, é preciso que se entenda que, de um modo geral, a literatura está tratando do colapso por aumento da umidade do solo, mas essa é apenas uma forma de energia desencadeadora do colapso. Existem outras, como o aumento das tensões induzidas, a vibração, a mudança da química do fluido. Em síntese, o colapso estrutural de um solo é fruto de sua metaestabilidade estrutural, ou seja, uma estrutura com pré-disposição a se modificar bruscamente devido ao contato com, por exemplo, água. Contudo, se o solo é um solo argiloso profundamente intemperizado, a sua metaestabilidade estrutural para um mesmo peso específico aparente seco será exatamente a mesma se os agregados não forem mais destruídos em uma umidade de compactação que em outra. É evidente que, sendo a sucção/capilaridade maior no ramo seco que no úmido, a variação da energia interna, sucção/capilaridade, imposta pelo aumento de umidade, será maior no ramo seco

do que no úmido, e para esse aumento de umidade, o colapso será maior no ramo seco. No entanto, supondo que ambos os solos foram levados à saturação e se, após essa fase, vier, por exemplo, a ação de uma vibração, o colapso estrutural será maior para a amostra compactada no ramo úmido, pois sua metaestabilidade foi, de certo modo, preservada, tendo em vista que as variações de sucção a ela impostas pelo processo de saturação foram menores. É evidente que a natureza do problema muda se, em lugar de um solo profundamente intemperizado, houver um solo pouco intemperizado, onde as partículas, em vez de se encontrarem agregadas, estiverem em situação individualizadas. Nesse caso, entra em ação a energia de superfície, as forças de atração e repulsão que são afetadas pelo nível de hidratação do solo e das próprias partículas. O solo, possuindo as partículas com forma lamelar, ao ser compactado no ramo seco, tende a apresentar estrutura floculada, com interação entre as cargas positivas dos bordos e as negativas da face. No ramo úmido, em função do próprio nível de hidratação inicial, a estrutura tende a ser a orientada ou dispersa, predominando interações face-face e bordo-bordo com forte influência das forças de repulsão. Nesse contexto, o aumento de umidade e a consequente variação da energia interna de sucção permitirão o desenvolvimento das forças de repulsão entre as partículas na estrutura floculada obtida no ramo seco, gerando sua instabilização estrutural e o consequente colapso. No entanto, se a forma de energia aplicada a ambas as amostras for outra, por exemplo, uma tensão aplicada ao solo, energia externa, certamente o solo compactado no ramo úmido se deformará mais do que o solo compactado no ramo seco.

Geralmente, a literatura traz também informações sobre a influência da compactação na deformabilidade e rigidez dos solos compactados (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987; Da Silva *et al.*, 2021, entre outros). No entanto, também aqui a questão tem que ser contextualizada, levando-se em conta o estado inicial do solo e a forma como está sendo avaliada essa deformabilidade ou rigidez. Por exemplo, dois solos contendo o mesmo teor de argila, considerando-se as partículas individualizadas e o mesmo argilomineral predominante, a caulinita, sendo um deles um solo profundamente intemperizado e, portanto, agregado, e o outro, um solo pouco intemperizado, não agregado. Esses solos, ao serem compactados na mesma densidade no ramo seco e no ramo úmido, terão comportamento quanto à deformabilidade e rigidez inteiramente distinto um do outro. Se ambos forem conduzidos à saturação antes de ensaiados, o solo profundamente intemperizado (agregado) tenderá a não apresentar diferença de comportamento quanto à deformabilidade e rigidez. Já o solo pouco intemperizado (não agregado) apresentará significativa diferença de comportamento em função da umidade de compactação, pois, enquanto no solo profundamente intemperizado, não houve interferência na estrutura, no solo pouco intemperizado, ela depende da umidade de compactação, tendendo a ser floculada no ramo seco e orientada no ramo úmido. Aqui, a técnica de compactação adotada interferirá pouco no comportamento do solo profundamente intemperizado, mas poderá induzir a uma maior ou menor orientação das partículas no caso dos solos pouco intemperizados.

Um outro exemplo da importância de um olhar mais amplo que aquele restrito à simples avaliação da influência da técnica e da condição de compactação no comportamento dos solos diz respeito à questão da permeabilidade. Tomando-se como referência os solos usados no exemplo anterior, se o solo for o profundamente intemperizado, como

não ocorrem significativas alterações estruturais, independentemente do tipo e da umidade de compactação, se a porosidade e, em especial, a macroporosidade forem mantidas, a permeabilidade não será alterada. O contrário ocorrerá para o solo pouco intemperizado, sendo necessário, no entanto, considerar a direção do fluxo em relação à maior ou menor orientação dada às partículas pela compactação. Geralmente, a literatura coloca que a permeabilidade de um solo argiloso pouco intemperizado (e.g. Roy & Rajesh, 2020) é, para um mesmo peso específico aparente seco, maior para o solo compactado no ramo seco do que no úmido. Porém, isso quase sempre só é verdade para o fluxo na direção vertical. Avaliando-se o fluxo na direção horizontal, enquanto a permeabilidade do solo será pouco afetada quando de sua compactação no ramo seco, no ramo úmido ela aumentará significativamente. Outras discussões poderiam ser feitas, mas acredita-se que as apresentadas são suficientes para mostrar que as análises de comportamento dos solos compactados devem ter um alcance mais amplo que a simples avaliação da influência da técnica, da energia e da umidade de compactação no comportamento do solo.

3. MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO

São vários os métodos que podem ser utilizados para compactação dos solos. Para cada um, estruturas diferentes para um mesmo tipo de material poderão ser obtidas. Os resultados de um processo de compactação dependem de diversos fatores, como natureza do solo, método de compactação utilizado, energia e teor de umidade (Holtz *et al.*, 2012). A densificação do solo por meio da compactação para umidades inferiores à correspondente a da linha ótima da curva de compactação (Figura 3) ocorre quando a energia externa aplicada supera a energia resistente. Para umidades superiores à correspondente à da linha ótima (Figura 3), a densificação do solo, obtida para uma determinada energia total de compactação, diminui com o aumento da umidade, pois, com ela, ao diminuir a quantidade de ar presente no solo, amplia-se a poropressão positiva gerada na compactação, fazendo com que, embora mantida a energia total de compactação usada, a energia efetiva diminua. A energia externa pode ser oriunda de ações dinâmicas, estáticas, semiestáticas ou vibratórias, sendo esta última, muitas vezes, entendida como dinâmica. Já a energia interna pode ser proveniente de ações capilares e de sucção. O tipo de mineral e o modo como a energia externa é aplicada pode fazer com que a água assuma certo efeito lubrificante.

Em laboratório, os métodos de compactação mais utilizados são: compactação dinâmica ou por impacto; compactação estática ou por pressão, sendo que, quando a pressão for crescente, ela passa a ser chamada de semiestática; compactação por pisoteamento, compactação por vibração e compactação vibro-estática. Já no campo, as mais comuns são as compactações semiestática, vibratória, vibro-estática e dinâmica. O método de compactação em laboratório deve ser compatível com o tipo de solo e com a técnica de compactação a ser adotada no campo (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987). No caso de solos apresentando agregados, concreções e aglomerados de partículas, independentemente do método de ensaio adotado, deve ser evitado o reuso do solo devido à mudança do material de um ponto da curva de compactação para o outro devido às quebras que ocorrem. Para esses solos é também recomendável que se evite sua secagem prévia, mesmo que ao ar.

3.1 Compactação em laboratório

A técnica de compactação em laboratório, aí incluindo-se, dentro do possível, a preparação da amostra, deve buscar simular a compactação que será feita no campo. No campo, em obras pontuais, tais como em aterros pré-existentes, é usada a compactação dinâmica, que consiste em deixar cair, de uma determinada altura, uma sobrecarga sobre o solo de modo a gerar a densificação de camadas métricas. No entanto, na construção de obras convencionais, tais como rodovias, ferrovias, aeroportos e barragens, são usados rolos de pata longa, pé de carneiro e de pata curta, rolos lisos e rolos pneumáticos. Todos esses rolos aplicam, no solo, uma energia semiestática, que cresce e decresce pontualmente, com a passagem do rolo. Os rolos de pata curta e os rolos lisos podem ser utilizados com vibração. A forma das patas intervém diretamente no resultado da compactação (Rico e Del Castillo, 2006).

Em laboratório, quando se pretende definir as condições de umidade e de peso específico aparente seco a serem utilizadas em campo, a técnica de compactação mais utilizada é a compactação dinâmica tipo Proctor. Hoje, no Brasil, em especial, no estado de São Paulo, tem sido usada, também, a técnica de compactação MCT (Miniatura, Compactação, Tropical) desenvolvida por Nogami e Villibor (1980 e 1981). No entanto, quando se pretende reconstituir amostras para a realização de ensaios como os triaxiais, o comum é o uso da compactação semiestática, fazendo-se uso de uma prensa com deformação controlada (de Lima *et al.*, 2019; Da Silva, 2020).

Tanto em campo como em laboratório, a escolha da técnica a ser usada está diretamente ligada ao tipo de solo e pode ser fundamentada na equação de resistência ao cisalhamento do solo (Equação 1).

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg}(\phi') \quad (\text{Eq. 1})$$

Se o solo é granular, a coesão real pode ser considerada nula, passando a existir apenas a coesão aparente devido à ação capilar que, com a vibração, tem o arranjo das moléculas de água no menisco perturbado, sendo, então, comprometida. Para superar essa resistência oriunda da coesão aparente, geralmente se acopla, à vibração, uma energia estática. No caso do solo granular, admitindo-se a inexistência de coesão, a vibração, ao afastar os grãos em parte dos contatos, conduz a zero a tensão efetiva de contato, tornando a resistência à compactação nula nesses contatos, viabilizando, assim, a densificação do solo. Se o solo for coesivo, tanto a coesão como o atrito são superados por energias de compactação dinâmica, estática ou semiestática. Nesse caso, a vibração não consegue afastar momentaneamente um grão do outro, o que conduziria, como no caso dos solos granulares, à resistência ao cisalhamento a zero.

Para se entender a influência da sucção no resultado de compactação, tal como o aumento do peso específico do solo no ramo seco da curva de compactação, quando, para uma mesma energia, aumenta-se a umidade de compactação, pode ser usada a equação (Equação 2) de resistência ao cisalhamento proposta por Bishop (1959).

$$\tau = c' + \{(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)\} \operatorname{tg}(\phi') \quad (\text{Eq. 2})$$

Na Equação 2, como a fase ar é contínua até a umidade ótima e a permeabilidade do solo ao ar é grande, a pressão na fase ar pode ser considerada nula. O parâmetro χ aumenta com o crescimento do grau de saturação, que, por sua vez, é função da umidade de compactação. Porém, a sucção matricial ($u_a - u_w$) diminui, o que, no conjunto, resulta em menor resistência ao cisalhamento do solo e maior efetividade da compactação para uma energia constante aplicada. Esse mecanismo de densificação do solo para uma energia constante de compactação prossegue até a oclusão da fase ar, momento em que o fluxo passa a ser o do fluido água-ar, com drástica redução da permeabilidade e geração de poropressão positiva, o que diminui a energia efetiva de compactação e, por consequência, a densificação.

Na compactação em laboratório, faz-se necessário considerar dois fatores geradores de gradiente de peso específico e de umidade no interior do corpo de prova: o atrito solo-molde e o efeito da reciclagem da carga na compactação em camadas. A análise desses fatores de modo a definir o número de camadas ideal é apresentado por Camapum de Carvalho *et al.* (1987) para a compactação semiestática.

3.1.1 Compactação estática, semiestática e por pisoteamento

O método de compactação estática consiste em compactar o solo utilizando-se uma carga constante aplicada sobre a amostra. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (1987), é o método de compactação que impõe o mais reduzido esforço cisalhante, levando, assim, à preservação de uma estrutura floculada e, portanto, de comportamento frágil. O método de compactação semiestática consiste em compactar o solo utilizando uma prensa que impõe uma velocidade de deslocamento ou uma taxa de carregamento constante. Neste item, também será considerada a técnica chamada pisoteamento, na qual as pressões são aplicadas por pulsos de pressão. Em todos esses tipos de compactação, é difícil precisar a energia empregada.

O ensaio de compactação estática baseia-se na aplicação de uma pressão uniformemente distribuída sobre a superfície do solo, procurando reproduzir as características do solo compactado em campo. Os métodos de ensaio utilizando a compactação estática são bastante variáveis, não havendo padronização quanto à carga aplicada, quanto ao número de camadas ou quanto ao tamanho do cilindro de compactação, sendo que, em alguns casos, é fixada a pressão aplicada ao solo e, em outros, fixa-se o peso específico que se deseja obter, sendo, então, aplicada a carga necessária para obtê-lo (Crispim, 2010). Mais informações sobre compactação semiestática podem ser conseguidas em, dentre outros, Aguiar (2010), Jacintho (2010), Zica (2010), Freitas (2016) e Al-Khyat (2018).

Já o ensaio de compactação por pisoteamento consiste na aplicação sucessiva de altas pressões sobre pequenas áreas da superfície da amostra, com pressões que variam com o tempo, crescendo e decrescendo, de forma cíclica. É indicado para solos coesivos e não para solos granulares devido ao efeito de quebra das partículas do solo. A ideia dessa técnica é simular o efeito produzido por um rolo do tipo pé de carneiro e outros tipos de equipamentos de campo com pata. A técnica foi desenvolvida por Wilson (1950) com o ensaio conhecido como Ensaio Harvard ou Ensaio de Compactação em Equipamento Miniatura. Esse ensaio utiliza um cilindro de 33,3 mm de diâmetro e 71,5 mm de altura, sendo o corpo de prova compactado com a aplicação, em cada camada, de golpes de um

pistão constituído por uma haste de 12,7 mm de diâmetro, acionada por uma mola cujo esforço aplicado é da ordem de 180 N. Na sua proposta, Wilson (1950) não definiu um número de camadas e nem de golpes a serem aplicados por camada, mas Head (1992) afirma que, ao se compactar o solo em três camadas e aplicando-se 25 golpes em cada uma, obtém-se uma energia próxima à do ensaio Proctor Normal. Wilburn *et al.* (2007) afirmam que o ensaio é vantajoso em relação ao ensaio do tipo Proctor quando se tem que ensaiar muitas amostras de uma vez, já que usa pouca quantidade de solo, e que as amostras preparadas no ensaio Harvard já são adequadas para serem usadas em ensaios de compressão simples ou triaxial. Informações adicionais sobre a técnica de pisoteamento e o ensaio Harvard Miniature podem ser obtidas em Abou Diab *et al.* (2018), Ribeiro *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2019).

3.1.2 Compactação por vibração

Para solos granulares, devido à baixa atividade de superfície, a vibração é um método mais adequado à compactação. Adicionalmente, ele é, muitas vezes, erroneamente, considerado como um processo que gera uma menor quebra dos grãos que a compactação estática ou dinâmica. Esclarece-se que as quebras de grãos podem ser significativas quando a vibração atua concomitantemente com uma energia estática, como no caso dos rolos vibratórios. A ação da vibração promove a movimentação das partículas, vencendo o atrito que há entre elas por tornar, conforme já mostrado, a tensão efetiva nula em alguns pontos de contato dos grãos. Nesse método, a compactação pode ser vibratória propriamente dita, ou vibro-estática. Na vibratória propriamente dita, o ensaio de compactação baseia-se na vibração de um molde cilíndrico, muitas vezes, o de Proctor, montado numa mesa vibratória. Já na compactação vibro-estática (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987), o solo colocado em um molde é submetido concomitantemente à vibração e a uma tensão estática geralmente aplicada na direção vertical, lembrando que, quando do uso de rolos vibratórios em campo, essa tensão vertical é de natureza semiestática. Muitos fatores influenciam nesses processos de compactação, tais como a frequência, a amplitude e a aceleração das ondas vibratórias, as sobrecargas, a granulometria e o teor de umidade do solo (e.g., Nagula *et al.*, 2018 e Dobrescu, 2020).

A determinação do índice de vazios máximo e mínimo é regida pelas normas ABNT (2021 – 16840) e ABNT (2020 – 16843), respectivamente. O ensaio também é normatizado pela ASTM (ASTM 2016a e b). Pela norma brasileira, o índice de vazios máximo é obtido de uma camada de areia depositada cuidadosamente com o auxílio de um funil em um cilindro cheio de água, método chamado, algumas vezes, de “pluviometria”. Assim, é um procedimento que não envolve nada de vibração, e a própria energia gravitacional é abrandada pelo empuxo da água sobre as partículas. Já a determinação do índice de vazios mínimo envolve o uso de uma mesa eletromagnética de vibração vertical, sendo permitida a alternativa de utilização da mesa vibratória dos ensaios de peneiramento quando não se dispuser da outra. O ensaio pode ser feito com material seco ou úmido, colocado dentro do molde cilíndrico utilizado nos ensaios Proctor. A norma, entretanto, recomenda a realização do ensaio pelos dois processos (via seca e via úmida) quando se estiver iniciando novo trabalho ou quando houver mudança no tipo de material, já que, para alguns

solos, o ensaio realizado com solo úmido (é usada uma quantidade de água na amostra que permita que ela se sature durante o processo de vibração) pode fornecer índice de vazios mínimo significativamente menor que o ensaio realizado com solo seco, pois a água pode atuar como lubrificante e, ao mesmo tempo, reduzir as tensões efetivas nos contatos. Para ser ensaiado de acordo com esse método, o solo precisa atender quesitos tais como ser totalmente passante na peneira de 19 mm e ter, no máximo, 12% de finos passando na peneira de 0,075 mm. A possibilidade de quebra de grãos deve ser verificada ao fim do ensaio com a realização de nova análise granulométrica. Informações adicionais sobre os métodos de determinação dos índices de vazios máximo e mínimo podem ser obtidos, por exemplo, em Medeiros (2018) e Sarkar *et al.* (2020).

A compactação por vibração também pode ser feita pelo uso de um martelo vibrador pesado. Um martelo adequado teria uma frequência entre 25 e 45 Hz, sendo ajustado a um soquete especial. Os resultados obtidos com ele são considerados mais confiáveis para pedregulhos e areias do que os resultados dos ensaios do tipo Proctor (Smith e Smith, 1998). Nesse equipamento, o solo é misturado com água e compactado em três camadas por pressão do soquete e vibração de 60 segundos por camada. Ainda de acordo com Smith e Smith (1998), esse método somente deveria ser utilizado para areias finas e para frações de solos mais grossos que passem na peneira de 37,5 mm. Mais informações sobre o uso de vibração para compactação de solos podem ser obtidas em Klinsky *et al.* (2018), Hu *et al.* (2020) e Arkadiusz *et al.* (2022).

O uso de vibração em solos profundamente intemperizados, como os cascalhos lateríticos e mesmo em solos pouco intemperizado apresentando aglomerado de partículas, como muitos saprólitos, pode provocar a quebra dos agregados ou dos aglomerados de partículas, conforme o caso. Tais quebras conduzem, muitas vezes, a um aumento do peso específico aparente seco, trazendo a falsa impressão de que se está melhorando o comportamento do solo. É verdade que, se a compactação estiver sendo aplicada em uma barragem de terra, ocorrerá a redução da permeabilidade do solo, o que pode ser entendido como uma melhoria de comportamento, no entanto, se a finalidade for a construção de uma estrutura de pavimento, geralmente, haverá um comportamento mecânico pior para os fins a que se destina.

3.1.3 Compactação dinâmica

O ensaio de compactação dinâmica original é o ensaio Proctor Normal, padronizado pela ABNT (2016 – NBR 7182, com versão corrigida em 2020) ou, dentre outras, pela ASTM (2021 – D 698-12) e AASHTO (2021a – T99). Ele consiste em compactar a amostra de solo com porcentagens crescentes de umidade em um molde cilíndrico padrão, com, aproximadamente, 1000 cm³, em três camadas, cada uma delas por meio de 25 golpes de um peso de 2,5 kg, caindo de uma altura de 30,5 cm. No início, os esforços de compactação nas obras eram menores, já que os equipamentos eram de menor porte e, geralmente, menos eficientes, e o ensaio Proctor Normal simulava bem a energias de compactação de campo. Com o aumento do tamanho e nível de solicitação das obras, do porte dos equipamentos de campo e, conseqüentemente, das energias de compactação *in situ*, o ensaio de laboratório teve que ser readaptado para representar maiores energias de

compactação, surgindo, assim, o Ensaio Proctor Intermediário e o Modificado (ASTM, 2015 – D 1557-12 e AASHTO, 2021b – T180), cabendo destacar que, talvez, o Brasil seja o único país a trabalhar com a energia Proctor Intermediário. No Brasil, essa energia foi adotada, principalmente, em função do tipo de solo, o cascalho laterítico, usado na maioria das obras de pavimentação, pois se percebeu que a energia correspondente ao Proctor Normal era insuficiente para se atingir o comportamento mecânico desejado e o Proctor Modificado gerava uma quebra significativa das concreções.

No Brasil, os Métodos de Ensaio ME-162 (DNER, 1994, quando se utilizam amostras trabalhadas ou deformadas) e a ME-163 (DNIT, 2013, quando se utilizam amostras não trabalhadas ou indeformadas) definem o modo de compactação para as energias de compactação Proctor Normal, Intermediário e Modificado. A energia de compactação (EC) é definida pela Equação 3. Nessa norma, o volume de solo, o número de camadas e de golpes e o peso do soquete variam de acordo com a energia que se deseja aplicar no ensaio, podendo, ainda, ser usado um cilindro pequeno ou grande.

$$EC = \frac{n.P.H.}{V} N \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: n = número de golpes do soquete padrão; P = peso do soquete (kgf); H = altura de queda do soquete (cm); V = volume do cilindro ou do solo compactado (cm³); N = número de camadas.

O ensaio Proctor é geralmente utilizado para obter a curva de compactação dos solos. Nele, pelas explicações já apresentadas, variando-se a umidade de compactação, varia-se o peso específico aparente seco obtido, o que permite a construção da curva de compactação do solo em laboratório. Alguns solos concrecionados ou apresentando partículas aglomeradas, podem apresentar um duplo pico de peso específico aparente seco – teor de umidade ótima. Isso costuma ocorrer porque, ao aumentar a umidade, fragilizam-se as concreções ou aglomerações presentes no solo, possibilitando a sua quebra, daí surgindo um novo material em termos texturais, o que possibilita o aparecimento de um segundo pico.

As curvas de compactação devem possuir, no mínimo, quatro pontos, pois são necessários, pelo menos, dois pontos no ramo seco e dois pontos no ramo úmido. O tipo de preparação de amostras para o ensaio de compactação pode influenciar o resultado obtido. Os dois fatores que mais podem influenciar são a secagem da amostra e seu reuso. Segundo Pinto (2006), a secagem prévia influencia as propriedades do solo, além de dificultar a posterior homogeneização da umidade incorporada. Com relação ao reuso de material nos ensaios, Aquino *et al.* (2008) verificaram que essa prática influencia os resultados obtidos, com tendência de aumento do peso específico aparente seco e de deslocamento da linha ótima para a esquerda, ou seja, os ensaios com reutilização de material aumentam o peso específico aparente seco máximo e diminuem o teor de umidade ótimo. Segundo os autores, esse efeito se deve à quebra das agregações presentes no solo virgem. Dias Neto (2020) discute a influência dos aspectos microestruturais produzidos por diferentes técnicas de reconstituição de corpos de prova para ensaios de laboratório nas propriedades hidráulicas e mecânicas de um solo tropical laterítico. Segundo o autor, a microporosidade do solo laterítico por ele analisado não seria afetada pelas condições de reconstituição (método de reconstituição, esforço de reconstituição ou teor de umidade de moldagem).

Existe uma variação desse ensaio dinâmico, que é o ensaio de compactação Mini-MCV (*Moisture Condition Value*), proposto por Sória e Fabbri (1980), cujos resultados são utilizados para a classificação de solos chamados de tropicais. O solo tropical é considerado aquele que apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento em decorrência de processos geológicos e/ou pedológicos, típicos das regiões tropicais úmidas (CTS-ISSMFE, 1985). O interesse nesse tipo de solo se deve ao fato de que, no Brasil, eles são abundantes e muito utilizados em obras rodoviárias. Segundo Nogami e Villibor (1995), os solos tropicais podem ser divididos em duas classes: os de comportamento laterítico e os de comportamento não laterítico, sendo que os primeiros merecem destaque por suas propriedades mecânicas no seu estado natural e em seu estado compactado. Segundo Santos (2006), um solo que apresenta comportamento laterítico adquire, quando compactado em condições ideais, alta capacidade de suporte e baixa perda dessa capacidade quando imerso em água. A baixa perda de capacidade de suporte quando da imersão está geralmente atrelada ao fato de que a sucção predominante e atuante nos macroporos do solo compactado é, frequentemente, pequena, sendo então o solo pouco sensível à sua perda oriunda da imersão.

Quintans (2008) apresentou uma comparação entre os resultados de curvas de compactação obtidos no ensaio Proctor e o Mini-MCV, nas energias normal e intermediária, respectivamente. O solo ensaiado foi classificado como de comportamento laterítico, contendo, na sua composição granulométrica, 26,44% de material passante na peneira 0,075 mm (nº. 200). Constatou-se que as massas específicas aparentes secas máximas obtidas dos ensaios Proctor foram inferiores às obtidas nos ensaios de Mini-Proctor para as duas energias, enquanto que os teores de umidade ótima correspondentes foram ligeiramente maiores nos ensaios Proctor.

3.2 Compactação no campo

Antes de se entrar na questão da compactação de campo, cabe apresentar alguns aspectos de laboratório que podem ser transportados para o campo. A compactação em camadas no laboratório tem por principal finalidade evitar gradientes de peso específico e de umidade ao longo do corpo de prova. Geralmente, não se discute o gradiente de umidade, mas é normal que ele ocorra, pois, ficando uma parte da camada mais densa, é natural que a água migre para a parte mais porosa, conforme mostrado por Camapum de Carvalho (1981). Em laboratório, conforme já dito, o gradiente pode ser gerado pelo consumo da energia de compactação pela interação solo-molde a partir do topo da camada ou devido ao efeito da reciclagem da energia em uma determinada camada quando se compactam as camadas que a ela se sobrepõem. Em campo, essas causas se repetem, mudando apenas o fato de a perda de energia por interação solo-molde em laboratório passar a ocorrer em campo pela interação do solo localizado no ponto submetido ao esforço de compactação com as demais partículas compondo continuamente a camada de solo. Esse efeito dissipador de energia no campo é menor que em laboratório, daí a possibilidade de se compactar camadas mais espessas. É importante lembrar que, nesse efeito, a dissipação da energia em campo se dará por atuação de coesão e atrito, enquanto, no laboratório, ela se dá mais função do atrito entre materiais distintos, o solo e o molde. Assim, é de se esperar que, no

campo, a espessura da camada a ser compactada com o mínimo de gradiente será função não só do tipo de equipamento, mas também do tipo de solo.

Outro paralelo que se pode fazer e que está diretamente associado à eficiência da compactação diz respeito às características do material de base sobre o qual a camada de solo a ser compactada se deposita. Em laboratório, parte-se, geralmente, de uma base metálica rígida e, no campo, de um material, na maioria dos casos, destinado a ser menos competente que a camada a ser compactada que a ele se sobrepõe. Essa observação é importante, pois coloca em destaque o fato de que a eficiência da compactação dependerá, também, da rigidez do material subjacente.

Um terceiro aspecto a ser destacado é o paralelo que se pode fazer entre a compactação no ramo úmido da curva de compactação em laboratório e a compactação de solos com excesso de umidade em campo. O princípio que leva à ineficiência na compactação no laboratório e no campo para essa situação é exatamente o mesmo, que é a geração de poropressão no fluido ar-água por perda da continuidade da fase ar, reduzindo, assim, a energia efetiva de compactação e, portanto, o seu efeito densificador.

Finalmente, por vezes, adota-se, em laboratório, em especial, quando se analisa alguns aditivos químicos e biológicos destinados à estabilização dos solos finos, a cura ao ar por 48h ou 72h. Essa recomendação é feita por Nogami e Villibor (1995) quando se executa uma camada de base com solo fino em campo para fins de pavimentação. Cabe aqui, no entanto, uma observação. Os solos finos geralmente usados em projetos de pavimentação são solos profundamente intemperizados e, portanto, isentos de argilomineirais expansivos. Frequentemente, eles são caulínicos, com teor variável de quartzo e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Com a cura ao ar, esse solo se contrai devido à atuação da sucção/capilaridade e, pela natureza mineralógica de suas partículas, quando de um eventual aumento de umidade ou mesmo saturação como ocorre em laboratório, expande menos que contraiu, gerando, assim, um produto geralmente mais resistente. Para averiguar a melhoria do solo devido à estabilização, deve-se submeter o solo não tratado ao mesmo tipo de cura ao ar. O mais importante aqui, no entanto, é salientar que a ação da sucção/ capilaridade constitui-se em forte energia densificadora do solo, podendo, em condições adversas ou naquelas preconizadas por Nogami e Villibor (1995), ser utilizada na compactação dos solos.

Tratando-se, agora, mais diretamente da questão da compactação de campo, as atividades que a envolvem começam já com a localização de áreas de empréstimo onde estarão os solos adequados para serem usados naquele projeto, sua remoção e transporte para o local da obra. A escolha é baseada em tipo, volume, propriedades e comportamento do solo necessário para a obra, além da distância de transporte. Também poderá ser necessário o ajuste desse solo para colocá-lo nas condições ideais para uso na obra, o que é feito após espalhá-lo em camadas que variam de 15 a 50 cm, dependendo do tipo de solo, do tipo de equipamento que será utilizado e do que se busca em termos de propriedades e comportamento da camada de solo compactada. Essas etapas preliminares não serão comentadas, sendo considerado que a camada de solo já está pronta para receber os esforços de compactação no campo. Serão comentadas algumas técnicas e equipamentos utilizados nesse processo.

Como na compactação feita em laboratório, os valores de pesos específicos secos obtidos no campo são função do tipo de solo, da quantidade de água utilizada e da energia específica aplicada pelo equipamento utilizado. A energia de compactação é função de fatores como tipo e peso do equipamento e do número de passadas e velocidade com que passa. Também no campo, a energia de compactação pode ser aplicada de maneiras diferentes: por meio de esforços de pressão, impacto, vibração ou por uma combinação destes. Na verdade, os processos de compactação de campo que usam a vibração o fazem de modo associado a uma pressão, já que a vibração utilizada isoladamente é pouco eficiente. Solos sem coesão terão uma compactação mais eficiente quando se emprega vibração. Os equipamentos mais utilizados no campo são os rolos pé de carneiro, liso, de pata curta e pneumático, sendo que a escolha é função do tipo de solo e das condições de execução (Tabela 1).

Tabela 1 – Tipos de solos e equipamentos sugeridos para fazer a compactação de campo

Tipo de solo	Equipamento sugerido
Solo rochoso, areias pedregulhosas	Rolo com malha ou rolo liso, rolos vibratórios e rolo grelha
Pedregulhos, areias	Rolo de borracha, rolo vibratório
Areias, pedregulhos, solo siltoso, solo argiloso	Rolos pneumáticos
Solo siltoso e solo argiloso	Rolo pé de carneiro
Solos em regiões confinadas	Placas vibratórias ou sapo mecânico
Areias	Rolo vibratório, compactação dinâmica

3.2.1 Compactação semiestática

A compactação semiestática baseia-se na aplicação de uma pressão crescente, uniformemente distribuída sobre o solo. O processo é executado com o uso de rolos, que compreendem os lisos de aço ou de tambor, os de pé de carneiro, os de pata curta, os de grelha e os pneumáticos. Os do primeiro tipo, rolos lisos, recobrem 100% da largura do rolo, com uma pressão que atinge, normalmente, 380 kPa (Holtz e Kovacs, 1981), podendo ser utilizados em qualquer tipo de solo, exceto nos rochosos, embora sejam comumente indicados para solos arenosos, pedregulhos e pedra britada, lançados em espessuras inferiores a 15 cm. Sua aplicação mais rotineira é em revestimentos asfálticos e no acabamento superficial das camadas compactadas.

Os rolos pneumáticos, por sua vez, fazem uma cobertura de 80% de sua largura e as pressões aplicadas pelos pneus podem chegar a 700 kPa (Holtz e Kovacs, 1981). O resultado da compactação depende da pressão nos pneus. São usados tanto para solos granulares como solos coesivos, em camadas de até 40 cm, para trabalhos de compactação de aterros para estradas ou barragens. Os rolos pneumáticos são eficientes na compactação de capas asfálticas, bases e sub-bases de estradas e indicados para solos de granulação fina e arenosa.

Já os rolos do tipo pé de carneiro são constituídos por cilindros metálicos dotados de protuberâncias intituladas patas, que estabelecem pequena área de contato com o solo, promovendo uma cobertura de 8 a 12% e exercendo pressões no solo que variam entre 1400 e 7000 kPa (Holtz e Kovacs, 1981). As patas desse rolo são consideradas longas e apresentam comprimento variando entre 15 e 25 cm. A forma das patas tanto nesses rolos como nos de pata curta são várias, sendo importante destacar, conforme mostrado por Rico e del Castillo (2006), que elas interferem na distribuição das tensões no solo. Esses rolos podem ser autopropulsivos ou arrastados por trator. Embora indicado para a compactação de solos coesivos, ele é, muitas vezes, usado em outros tipos de solo com a finalidade de promover a compactação da parte mais profunda da camada. A altura da camada compactada possui, geralmente, 15 cm e a compactação se dá de baixo para cima.

O rolo de tela, malha ou grelha é frequentemente utilizado quando o material colocado na pista para ser compactado apresenta elementos com dimensões superiores a admitida. Nesse caso, sendo o material quebradiço com a energia concentrada nas lâminas, esse rolo é usado. Ele faz uma cobertura de, aproximadamente, 50%, aplicando uma pressão de 1440 a 6200 kPa (Holtz e Kovacs, 1981). À medida que ele é rebocado, o rolo é vibrado, e o solo tem grãos quebrados em diferentes tamanhos, ficando menos uniforme e enquadrando-se nos limites de tamanho de grãos admitido.

Para se aumentar a eficiência do processo de compactação de solos granulares, no qual os rolos pneumáticos e de pata curta não atuam com eficiência, foram adicionados, a alguns equipamentos, vibradores verticais aos rolos ou rodas, formando os chamados rolos vibratórios. Nestes, a frequência da vibração influi significativamente no processo de compactação do solo. A espessura máxima de camada recomendada para receber esse tipo de equipamento é de 15 cm (Holtz e Kovacs, 1981). Cabe lembrar que, muitas vezes, a maior eficiência desses rolos com vibração se deve à fragilidade de agregados que, ao se quebrarem, possibilitam o aumento do peso específico aparente seco sem que, forçosamente, implique a melhoria do comportamento mecânico. Existem, ainda, as placas vibratórias e os sapos mecânicos de tamanho e peso variado, desenvolvidos especialmente para serem utilizados em locais onde os equipamentos de grande porte não possuem acesso. No caso de um depósito espesso de solo sobre o qual será construída alguma estrutura ou ampliada a altura de um aterro, outras técnicas precisam ser empregadas, já que a compactação feita na superfície atinge só uma profundidade pequena. Como a remoção da camada pode não ser econômica, a densificação pode ser feita por explosões, vibroflotação ou ainda por compactação dinâmica quando são aplicados vários golpes com um peso de 10 a 40 toneladas, caindo de 10 a 40 metros de altura.

3.2.2 Especificações gerais e alguns métodos de controle de campo

O controle da compactação no campo, em geral, resume-se em verificar se o peso específico e o teor de umidade especificados em projeto foram atingidos. Há uma boa correlação entre esses valores de peso específico e umidade com as propriedades de engenharia do solo, o que faz com que seu controle seja um procedimento quase sempre conveniente (Holtz e Kovacs, 1981). Deve-se ter em mente que o objetivo real do controle de campo é o de verificar se as propriedades de engenharia previstas em projeto foram realmente atingidas e, nesse sentido, muitas vezes, o peso específico é atingido porque, no campo, o

material é, em sentido amplo, diferente do laboratório ou não é atingido pelo mesmo motivo. Exemplificando: uma jazida de cascalho laterítico apresenta, muitas vezes, apesar de semelhanças de cor e textura, um perfil estratigráfico em que a composição químico-mineralógica e, por consequência, a densidade real dos grãos, altera-se com a profundidade. Para os estudos de laboratório normalmente realizados, dadas as semelhanças, são misturados materiais de diferentes profundidades ou, por uma questão de facilidade, o material é simplesmente coletado em uma única profundidade. No entanto, no campo, geralmente, a jazida é explorada por camadas, fazendo sobressair diferenças em relação à previsão de projeto feita com base nos estudos de laboratório. Em casos como esse, o ideal é que se analise tanto os resultados de laboratório como os de campo em termos de índice de vazios, eliminando-se, assim, a influência da densidade real dos grãos.

Comumente, as especificações para a execução do projeto no campo nascem após a execução dos ensaios de laboratório com o solo da área de empréstimo selecionada. Recomenda-se que, em perfis de intemperismo tropical, devido às alterações químico-mineralógicas, façam-se alguns estudos em perfil, deixando-se um pouco de lado a separação em camadas com base em características como cor e textura. É, ainda, recomendável para esses solos verificar se a curva de compactação obtida com secagem da amostra, como normalmente se faz, é igual à obtida para o solo a partir da umidade de campo, secando-se o solo o necessário apenas até a atingir a umidade de compactação, pois essa será a condição de compactação no campo. Se o solo possui agregados dotados de microporosidade, em campo, essa microporosidade estará geralmente saturada, mas, uma vez seca em laboratório, dificilmente ela volta a essa condição de saturação, impondo, assim, uma diferença na umidade ótima. Um outro aspecto já relatado diz respeito à possibilidade de presença de haloisita hidratada, que, ao se desidratar, não se reidrata com o umedecimento, gerando, assim, diferenças em relação ao campo tanto no peso específico, devido à mudança na densidade da haloisita, como na umidade ótima, devido à impossibilidade de sua reidratação.

Uma vez definido o material que será compactado, a estrutura é projetada e, então, são escritos os procedimentos de compactação a serem seguidos no campo, inclusive com a definição dos ensaios de campo cujos resultados servirão de base para o controle da qualidade da construção. Existem, basicamente, dois tipos de especificações que são feitas para a execução dos trabalhos de compactação no campo. Um dos tipos determina somente o resultado final que se deseja, consistindo em informar qual grau de compactação é aceitável para aquele solo, sendo o grau de compactação a relação entre o peso específico aparente seco de campo e o peso específico aparente seco máximo de laboratório, obtido de acordo com o ensaio padrão especificado. Esse tipo de especificação é muito utilizado para estradas e mesmo preparação de terrenos para servir como fundação. Uma vez determinado o grau de compactação desejado, em geral, não há nenhuma exigência com relação ao tipo de equipamento e nem quais procedimentos serão utilizados para se atingir aquele valor de peso específico.

Como compactar solo no ramo úmido ou seco fornecerão produtos com diferentes propriedades de engenharia, também se deve especificar a faixa aceitável de variação do teor de umidade no campo em relação ao teor de umidade ótimo de laboratório. Desse modo, não basta apenas definir o grau de compactação, mas também a faixa aceitável de teor de umidade para garantir maior proximidade do comportamento de campo com o da-

quele esperado, já que, no campo, o peso específico desejado pode ser atingido aplicando-se uma combinação de diferentes esforços de compactação com diferentes teores de umidade. Por exemplo, um solo com teor de umidade acima da ótima pode atingir o valor de peso específico de projeto se um maior esforço de compactação for aplicado por meio de mais passadas ou equipamento mais pesado. Isso, porém, traz efeitos que já foram previamente comentados, tais como o fato de solos compactados com teor de umidade acima do ótimo e com elevados níveis de energia de compactação possuírem, se pouco intemperizado, resistência mais baixa para baixos níveis de deformação.

O outro tipo de especificação detalha os métodos de execução da obra, ou seja, determina o tipo de equipamento, quantas passadas, altura da camada, etc. Nesse caso, é comum fazer a construção de camadas para teste para se chegar a alguma conclusão sobre essas especificações. Esse tipo de especificação só se justifica para obras muito grandes, de alta responsabilidade e custo.

Na compactação de campo, se o solo utilizado variar muito, deve-se ter maior atenção ao se determinar o grau de compactação, uma vez que esse solo usado no campo poderá ser diferente do ensaiado em laboratório. Quando já se percebe claramente que o solo que está sendo compactado na obra passou a ser diferente do previamente utilizado, uma técnica que pode ser utilizada é fazer uma verificação utilizando um ponto único da curva de compactação desse novo solo, conforme descrito em Holtz e Kovacs (1981). Para tanto, deve ser coletada, no campo, uma quantidade de solo suficiente para ser executado um ponto da curva de compactação com um teor de umidade abaixo do teor de umidade ótimo. O esforço de compactação deve ser aplicado sobre uma superfície rígida, sendo descartados pavimentos asfálticos ou os próprios solos compactados como apoio para compactação desse molde, de modo a tornar a situação similar à de laboratório. O processo pode ser entendido com auxílio da Figura 6. Aí, estão representadas três curvas de compactação obtidas em laboratório com diferentes energias aplicadas ao solo inicialmente previsto para utilização na obra. O resultado do ensaio de verificação feito no solo considerado diferente é representado, nesse gráfico, pelo ponto X. Por similaridade com as demais curvas, é possível se obter a provável curva de compactação do novo solo e, por consequência, estimar o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima de compactação, que deve se situar sobre a linha ótima. Percebe-se que, se esse ponto de verificação fosse feito com o solo em um teor de umidade acima do teor de umidade ótimo, ponto Y, não seria possível distinguir de qual curva esse resultado mais se aproximaria, pois, no ramo úmido, a energia efetiva de compactação muda em função da poropressão positiva gerada. Essa técnica, porém, só é recomendável para solos com composição químico-mineralógica semelhante, não exatamente igual em teor, a menos que este afete a estabilidade estrutural de agregações e aglomerados de partículas, e para solos que apresentem textura pouco evolutiva com as condições de compactação (Camapum de Carvalho, 1985).

O desenvolvimento tecnológico tornou possível e prático englobar, nos controles de compactação de campo, a aferição do número de passadas do rolo por meio do acoplamento de um GPS e tela de vídeo no equipamento trator sendo visualizado pelo operador. Nessa técnica, a cor da camada que está sendo compactada vai mudando na tela na medida em que se amplia o número de passadas, tornando possível detectar trechos onde o número de passadas especificado não foi atingido. A visualização da tela de modo remoto

pode ser acompanhada nos escritórios de projeto, execução e fiscalização. O sistema de controle via digital pode, também, ser implementado em relação a remoção do material na jazida e sua deposição em locais específicos da obra, bastando, para isso, o uso de cartões contendo leitura ótica. Essa técnica não elimina a necessidade de verificação do estado do material compactado *in situ*, no entanto, ela aumenta o nível de confiança na representatividade daquele ponto em relação à obra como um todo. Portanto, estão disponíveis no mercado, equipamentos que fazem o monitoramento constante para melhores resultados na compactação, dispondo de equipamento na cabine permite o acompanhamento de todo o processo, informando o operador sobre o índice de compactação inteligente atingido e a quantidade de passadas em cada ponto da superfície compactada. Como prova da qualidade da compactação realizada, todos os dados de produção são armazenados. Em ambientes onde vários rolos operam simultaneamente, é possível sincronizar os dados de produção entre eles em tempo real, evitando, assim que um rolo compacte uma região já compactada por outro equipamento. Assim, o desenvolvimento tecnológico permitiu a implementação cada vez mais difundida do que se chama Controle de Compactação Inteligente (Intelligent Compaction Control - ICC), que consiste em um contínuo controle e monitoramento da compactação usando rolos com energia de compactação ajustável (amplitude, frequência e velocidade do rolo). Em ICC, uma série de parâmetros são medidos: deslocamentos/amplitude do rolo (para cima e para baixo) usando o acelerômetro montado no tambor, frequência, velocidade do rolo e várias capacidades relativas de rolamento ou valores equivalentes de rigidez/densidade (e.g. Hossain *et al.*, 2006; Anderegge *et al.* 2006; Cai *et al.*, 2017, Kodikara *et al.*, 2018).

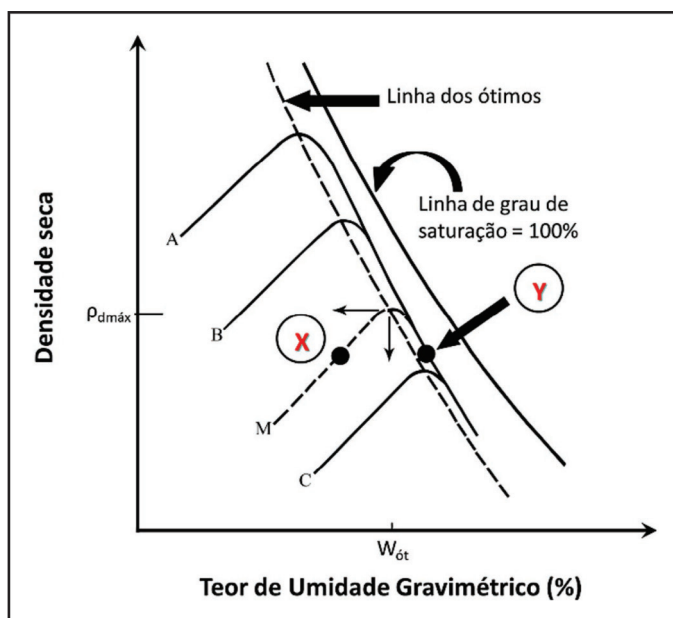


Figura 6 – Método de checagem da densidade de campo utilizando um único ponto (modificado de Holtz e Kovacs, 1981)

4. CURVAS TÍPICAS DE COMPACTAÇÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO

Como já visto, o formato da curva de compactação é função de vários fatores, podendo mudar para o mesmo solo. Das (2006) apresentou resultado do estudo do comportamento de 35 solos quando compactados. Neste estudo, foi verificado que eles apresentaram quatro tipos de curvas de compactação, que estão representadas na Figura 7. A curva do tipo A, que apresenta um único ponto de máximo bem distinto, seria característica de solos que possuem limite de liquidez entre 30 e 70. A curva do tipo B seria típica de solos com limite de liquidez menor que 30, apresentando um pico distinto e outro ponto de mínima no ramo seco. O mesmo acontece com a curva do tipo C, também típica para solos com limite de liquidez menor que 30, que apresenta dois trechos com concavidade para baixo, ou seja, dois pontos de máxima e um de mínima. Já a curva do tipo D não apresenta nenhum pico. Esse tipo de curva poderia ocorrer para solos com limite de liquidez acima de 70, que também poderia apresentar uma curva do tipo C. Verifica-se que as análises feitas por Das (2006) apenas enquadram os solos segundo suas propriedades, mas não apresentam o entendimento das particularidades das curvas, o que se buscará fazer a seguir.

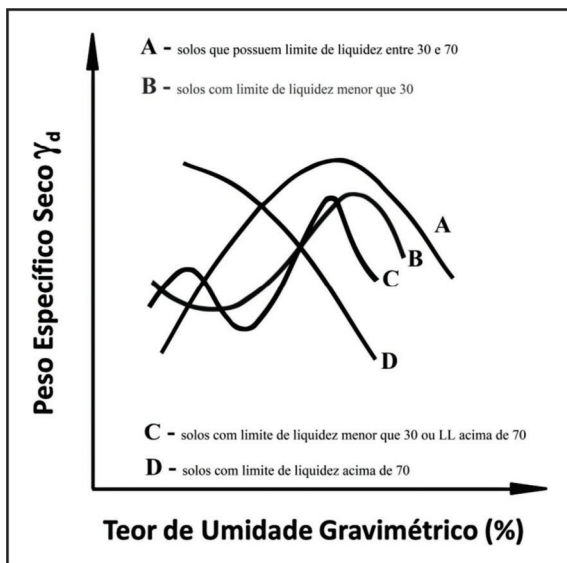


Figura 7 – Tipos de curva de compactação (adaptado de Das, 2006)

Inicialmente, faz-se necessário estabelecer o que comanda a redução da porosidade do solo durante o processo de compactação. Aqui, optou-se, propositalmente, por se usar o termo porosidade em lugar de peso específico aparente seco ou densidade. Essa opção se deve ao fato de que a porosidade independe da densidade real dos grãos, enquanto o peso específico está diretamente associado a ela, podendo induzir a interpretações errôneas na análise de resultados. Ainda, poder-se-ia ir um pouco além e incluir, na discussão,

a distribuição de poros, tão relevante para o comportamento dos solos tropicais e dos Resíduos de Construção e Demolição (RCC) quando compactados (Camapum de Carvalho, 2017). Voltando-se à questão central, no ramo seco, a redução maior ou menor da porosidade durante o processo de compactação é função da energia aplicada e da energia resistente, também intervindo, no processo, a maior ou menor estabilidade de agregados, aglomerados de partículas e, embora mais raramente, das partículas individualizadas. No ramo úmido, a maior ou menor porosidade oriunda da compactação é, frequentemente, fruto da geração de poropressão positiva no sistema ar-água contido nos poros do solo durante a aplicação da energia de compactação, fazendo com que diminua a energia efetiva de compactação. A energia externa é, geralmente, aplicada de quatro formas, estaticamente, semiestaticamente, dinamicamente e por vibração, sendo que muitos autores consideram a energia vibratória como dinâmica. Embora a energia vibratória seja efetivamente dotada de dinâmica, a distinção parece apropriada em função das especificidades da dinâmica nos dois métodos tanto em laboratório como no campo. Já a energia interna é avaliada, por uma questão de simplicidade, por meio de propriedades como lubrificação e capilaridade/sucção. Porém, é importante que se saiba que tais propriedades são ditadas pelas propriedades físicas e/ou químico-mineralógicas do solo e do sistema solo-água, sendo, no caso das argilas, relevante o balanço entre as forças de atração e repulsão entre as partículas. No que se refere à estabilidade dos agregados e aglomerados de partículas, os principais elementos intervenientes são as cimentações internas, que podem ou não estar presentes, e a capilaridade/sucção. Apenas a título de exemplo da importância da sucção/ capilaridade, se um solo agregado ou constituído por um aglomerado de partículas não for estruturado por efeito de cimentação, sua secagem prévia elevará enormemente a sucção/ capilaridade. Quando de uma eventual saturação, a água, ao penetrar esses elementos, submeterá a fase ar a pressões positivas, promovendo a separação das partículas.

As curvas do tipo A (ver a Figura 7) constituem o modelo padrão em que, por efeito de maior lubrificação entre os grãos e devido à redução da capilaridade/sucção ao diminuir a energia resistente com o aumento da umidade, a energia externa de compactação aplicada torna-se mais efetiva, provocando a redução da porosidade do solo. Como já mencionado, quando ocorre a oclusão da fase ar, inicia-se a geração de poropressão positiva na água, reduzindo a energia efetiva externa aplicada e, por consequência, permitindo menor redução da porosidade.

As curvas do tipo B e C (Figura 7) podem ocorrer em duas circunstâncias: a) quebra de agregados ou aglomerações de partículas, formando o primeiro pico ao dar origem a um novo material, para o qual se obtém o segundo pico; b) teor de umidade insuficiente para gerar o efeito resistente da capilaridade/sucção no ramo seco do primeiro trecho, daí o aumento de peso específico por alívio das tensões efetivas normais nos contatos até que certa adesão da água com os minerais em contato faça cair o peso específico. Ao se formarem os meniscos ou estabelecer-se a continuidade da fase água entre argilominerais, dá-se início à formação do segundo pico, seguindo a descrição do apresentado para a curva A. A curva D (Figura 7) pode ocorrer por dois motivos: a) devido ao aumento das forças de repulsão entre partículas de argilominerais com o aumento do teor de umidade; b) em materiais hidrofugantes, para os quais o aumento de umidade gera o afastamento das partículas de solo.

A literatura tem apresentado que a eficiência da compactação não tem se mostrado proporcional ao aumento da energia (Cernica, 1995; Quintans 2008, Kodikara *et al.*, 2018). O fenômeno é, no entanto, de fácil compreensão. Qualquer que seja a energia de compactação, mantida a área de sollicitação, ao iniciar a compactação sob uma determinada energia, amplia-se a energia resistente oriunda dos contatos, fazendo com que a energia externa passe a ser consumida nos primeiros centímetros, impedindo a propagação para os centímetros seguintes. Ao se ampliar a área de contato, por exemplo, aumentando a área da pata, a tendência é atingir camadas mais profundas, devendo-se, evidentemente, levar em conta a energia atuante. Também, a forma da área por meio da qual se transmite a energia externa de compactação ao solo afeta o resultado da compactação devido à distribuição das tensões, ou seja, uma pata de forma quadrada terá uma eficiência na compactação distinta daquela oriunda de uma pata circular.

5. USO DE SOLOS COMPACTADOS

Neste item, serão apresentadas informações sobre técnicas e experiências sobre o uso dos solos compactados em algumas obras de engenharia.

5.1 Em aterros para barragens

Na Engenharia Civil, o termo “aterro” está ligado à subida do nível de um terreno realizado, na maioria das vezes, utilizando-se solos compactados. Aterros são utilizados em diversas obras, e a construção de barragens de terra está intimamente ligada a eles. Neste item, será descrita a utilização de solos compactados em aterros, dando-se ênfase, principalmente, à sua utilização em barragens. Nas especificações técnicas de barragens, o termo “aterro” é, muitas vezes, substituído pelo termo “maciço compactado” e se refere às zonas de materiais terrosos, areias, materiais argilosos, granulares e enrocamentos. Nesse subitem, o uso do termo será limitado ao maciço de solo e refere-se ao depósito artificial de solo compactado, implicando escavação, transporte e compactação do solo.

A compactação de aterros tem como objetivo a homogeneização e a melhoria de suas propriedades de engenharia. No processo de compactação em campo, usualmente, é realizado um processo mecânico, envolvendo compressão, apiloamento ou vibração, e o controle é realizado com base em dados de laboratório, ou seja, os dois processos, compactação de campo e laboratório, são essenciais para garantir um aterro seguro. Torna-se necessário o projetista definir, com base na obra, qual a variação que as propriedades de interesse do empreendimento podem ter em função das variações do ensaio de compactação e do seu impacto no comportamento do material compactado. Portanto, uma vez estabelecida as condições de projeto, importa assegurar que elas serão respeitadas na execução da obra, razão pela qual surge a necessidade de proceder ao controle de compactação *in situ*. Na construção de uma obra de terra compactada, há um conjunto de decisões que vão desde a escolha do material, a área de empréstimo, a fixação dos parâmetros de projeto, a escolha dos equipamentos, a execução da obra e ainda as operações de controle, pressupondo-se haver um perfeito domínio sobre toda a problemática envolvida na compactação (Melo e Ferreira, 1981).

5.1.1 Compatibilidade entre compactação de laboratório e de campo

A compactação de campo é definida em função da finalidade, construção ou complementação e das condições de execução, canal, aterro, etc. Para a elaboração de um projeto de uma barragem, os parâmetros de cálculo são tomados com base em ensaios de compactação de laboratório e dos estudos de comportamento realizados sobre esses solos. A compactação de laboratório é definida buscando-se adotar a metodologia que mais a aproxima da condição de campo. Portanto, alguns aspectos devem ser observados na realização dos ensaios de laboratório e serão comentados nas alíneas a seguir.

a) Tipo de solo

Como já visto, o tipo de solo influencia de maneira decisiva o processo de compactação, prevalecendo a distinção entre solos finos e grossos e entre solos argilosos e arenosos ou siltosos. Os solos coesivos, caso da maioria dos solos utilizados em aterros no Brasil, em especial, nos destinados a núcleos de barragens, apresentam argila em sua composição e, portanto, podem apresentar diferentes argilominerais, ou seja, os fenômenos envolvendo forças elétricas entre as partículas têm um papel fundamental no seu comportamento e variam de solo para solo. A compactação dos solos argilosos com elevada energia ou umidade geralmente leva à orientação das partículas e ao predomínio das forças de repulsão entre elas, com isso, causando a ampliação da anisotropia de comportamento hidromecânico. No caso de barragens de terra e/ou terra e enrocamento, esse aspecto assume grande importância por impactar diretamente o fluxo. Cabe salientar que, no caso dos solos profundamente intemperizados, como os solos lateríticos, como as partículas encontram-se na maioria agregadas, esse efeito de orientação de partículas praticamente inexistente, sendo, porém, muito relevante no caso dos solos pouco intemperizados, os solos saprolíticos. Essa situação é bem conhecida em obra quando, por qualquer motivo, o número de passagem do rolo compactador é aumentado, e, então, percebe-se que as camadas perdem a ligação entre elas e começam a se separar em estratos. Portanto, o ensaio de laboratório deve ser adequado ao tipo de solo a ser compactado, conforme já discutido no item 2.1, devendo-se, ainda, ser dada maior importância às propriedades físicas e químico-mineralógicas do solo.

b) Coleta e preparação de amostra

Embora algumas situações, em especial àquelas ligadas às fundações e ombreiras, requeiram, muitas vezes, a coleta de amostras indeformadas, esse item terá por foco as amostras deformadas. Destaca-se, no entanto, que, no caso das ombreiras, em que é relevante o comportamento mecânico quando a amostragem se der em solos pouco intemperizados contendo partículas lamelares orientadas, faz-se necessário definir a orientação da amostra em relação à estratigrafia e à própria obra. Para o solo de fundação, geralmente são relevantes a compressibilidade e a permeabilidade, sendo que, no caso de presença de solos pouco intemperizados contendo partículas lamelares orientadas, faz-se necessário definir a orientação da amostra em relação à estratigrafia e direção de fluxo.

A coleta e preparação de amostras quando se trata de perfis de intemperismo tropical requerem atenção especial, pois suas propriedades e comportamento geralmente va-

riam ao longo do perfil em consequência do nível de intemperização sofrido, tornando-se recomendável a coleta e realização de alguns estudos em perfil na área da jazida a ser explorada. Esse estudo em perfil deve levar em conta a altimetria, colocando, em um segundo plano, aspectos como cor e textura. Em casos de previsão de estabilizações químicas, é importante que se determinem alguns perfis químico-mineralógicos na área de empréstimo.

Quando se tratar de solos profundamente intemperizados, se a prática da empresa for a realização de estudos a partir de amostras secas ao ar, é recomendável que antes se façam alguns ensaios, inclusive o próprio ensaio de compactação, com o solo na umidade natural e com pré-secagem e se compararem os resultados. Apresentando diferenças relevantes, o recomendável é fazer uso de amostras sem secagem prévia, pois, em campo, ela não ocorrerá, acontecendo, no máximo, ajustes de umidade.

Quando se tratar de solos pouco intemperizados, fazem-se necessárias análises mineralógicas para verificar se o solo não apresenta argilominerais expansivos ou mesmo se, quando compactado, não apresentará expansão estrutural. Essas análises devem também ser efetuadas em perfil, pois ele encontra-se em evolução. Esses estudos preliminares ainda na fase de amostragem e preparação de amostras é importante, pois orientarão as definições de projeto e condições de execução da obra. No caso dos solos pouco intemperizados, a secagem prévia pode também afetar os resultados, sendo relevante o estudo comparativo entre amostras com e sem secagem prévia.

Portanto, nos perfis de intemperismo tropical, tanto no caso de solos profundamente intemperizados como no caso de solos pouco intemperizados, as condições de coleta e preparação de amostras são de fundamental importância para que os estudos de laboratório sejam representativos do comportamento dos solos *in situ*.

c) Método de compactação

Na execução do ensaio em condições de laboratório, todos os fatores que influenciam o resultado obtido na compactação de solos podem ser controlados com exatidão, mas, normalmente, isso não é possível nas condições existentes no campo durante os trabalhos de construção. Assim, devido a inúmeros fatores, os ensaios de laboratório não são necessariamente representativos dos resultados de campo, mas, apesar disso, têm sido amplamente adotados e considerados satisfatórios na determinação dos parâmetros de projeto a serem empregados na obra.

Nos estudos realizados para a obtenção dos parâmetros utilizados no projeto, a moldagem dos corpos de prova é realizada em laboratórios de forma que a estrutura e o comportamento mecânico e/ou hidráulico sejam similares ao do material compactado no campo e, nesse caso, deve-se levar em conta a influência do tipo de compactação na preparação das amostras. Camapum de Carvalho *et al.* (1987) realizaram estudos com um solo calcário argiloso e concluíram que o método de compactação semiestática conduz a amostras de laboratório que têm uma estrutura e um comportamento mecânico muito perto do material compactado no campo. Com base nesses resultados e em outros estudos, seria recomendado utilizar a compactação semiestática na preparação dos corpos de prova em laboratório para se analisar qual seria o comportamento *in situ*. Porém, a compactação normatizada no Brasil é a compactação dinâmica (ABNT, 2016) e é esse o tipo

de compactação utilizado em todos os controles de aterros de barragens. Na prática dos laboratórios montados nas obras, realizar compactações diferentes da dinâmica pode não parecer razoável, pela estrutura já montada e pela dinâmica de como os resultados são obtidos, no entanto, considerando-se o custo do empreendimento, quando necessário, a infraestrutura deve ser adaptada. Destaca-se, no entanto, que a compactação dinâmica tem demonstrado que os resultados, em termos de controle de compactação, são satisfatórios. Porém, se o objetivo for averiguar os comportamentos hidráulico ou mecânico, faz-se necessário avaliar qual técnica adotar.

d) Energia aplicada

Na compactação de campo, a energia específica, que é a energia que se emprega ao solo por unidade de volume durante o processo mecânico, depende da tensão, da área de contato entre o rolo e o solo, da forma da área de contato, da espessura da camada e do número de passadas do rolo e, ainda, embora geralmente não consideradas, das propriedades mecânicas da camada subjacente. Para a definição da energia no campo que seja correspondente à usada no laboratório, no caso de barragens, são comumente executados estudos em pistas experimentais. Para cada tipo de equipamento, existe um limite para a compactação, e a utilização de aterros experimentais é importante para definir esse limite. A execução desses aterros experimentais permite o estudo dos diversos parâmetros que podem influenciar melhor a compactação, tais como a velocidade de compactação, o número de passadas e a espessura da camada. Na construção de um aterro experimental, dois fatores devem ser fixados: o solo e o equipamento. A modificação de qualquer um deles implica a realização de outro aterro experimental. Outro aspecto que deve ser levado em conta na execução do aterro experimental é a velocidade do equipamento compactador. Na maioria dos casos, as velocidades são limitadas para não influenciar os resultados.

e) Quantidade e qualidade da água a ser incorporada ao solo

O entendimento do comportamento da curva de compactação no ramo úmido é importante em algumas seções da barragem, já que a compactação é especificada nessas condições. Nesses casos, deve-se ter maior cuidado na realização da compactação em campo, pois, dependendo do solo, a diferença entre o ramo úmido e a curva de saturação é pequena, e variações na umidade de compactação, mesmo baixas, podem inviabilizar o processo no campo, pois, sendo o volume de ar pequeno, a compressibilidade do fluido ar-água também será pequena e a energia de compactação efetiva é enormemente diminuída. Nessas situações, sendo o solo pouco intemperizado, solo saprolítico, a esse efeito se soma a orientação e ampliação das forças de repulsão entre as partículas, implicando a laminação do solo e o comportamento altamente plástico. Camadas com laminação não são aceitáveis em barragens e devem ser retiradas, pois, aos já citados efeitos, soma-se a ampliação da permeabilidade horizontal.

Um fator que não tem sido levado em conta, mas que é de suma importância, é, dependendo das propriedades químico-mineralógicas do solo, a qualidade da água. Tanto em laboratório como no campo, a qualidade da água pode afetar diretamente o resultado da compactação e o comportamento solo. Por exemplo, admitindo-se que o solo a ser usado no núcleo de uma barragem é um solo profundamente intemperizado, agregado,

com pH inferior ao seu ponto isoelétrico, ou seja, ao ponto de carga zero, a incorporação de água com pH elevado ou mesmo de um estabilizante químico, como a cal, a esse solo, fará com que o seu pH passe pelo ponto de carga zero, gerando a sua desagregação. Coelho *et al.* (2016) apresentaram um estudo para solos profundamente intemperizados mostrando a influência do uso de uma água de manancial contaminada sobre os resultados da compactação do solo em laboratório. No estudo, foram utilizadas água destilada, água potável e a água proveniente de um manancial contaminado por coliformes fecais.

f) Temperatura

Nos ensaios realizados no laboratório, a temperatura tem pouca influência, pois, normalmente, esses são climatizados. No campo, a temperatura exerce importante efeito no processo de compactação. Em primeiro lugar, devido aos efeitos de evaporação, retirando água do solo, e, em segundo, devido à condensação da umidade ambiente, acrescentando água ao solo. Mas outro efeito, quase sempre pouco lembrado e que deve ser considerado, é a influência da temperatura nas variações volumétricas da água e do ar e na própria sucção atuante no solo, como mostrou Lima (2018). Portanto, no processo em campo, as condições climáticas devem ser levadas em conta no planejamento da obra.

5.1.2 Recomendações gerais de projeto de aterros para barragens

As atividades de construção do maciço compactado normalmente consistem nas seguintes operações: a) estudos preliminares e escolha da área de empréstimo; b) escavação, transporte, lançamento e espalhamento do solo; c) ajuste da umidade e homogeneização; d) compactação dos materiais terrosos nas diversas zonas da barragem; e) controle de qualidade dos materiais e serviços; f) serviços de instrumentação do aterro. Essas etapas fazem parte da maioria das especificações técnicas de obras civis de construção de barragens de terra e, muitas delas, são realizadas concomitantemente. As especificações trazem padronizações que buscam aterros mais homogêneos e que apresentem características de resistência, deformabilidade e permeabilidade que permitam a eles o pleno desenvolvimento de suas funções durante a construção e período operacional. Neste item, são apresentadas as principais recomendações de projetos, baseadas nas especificações técnicas de obras civis de construção de barragens de terra em diversos estados do Brasil.

a) Área de empréstimo

Na construção de aterros, o ideal seria a utilização dos materiais provenientes das escavações obrigatórias. No entanto, na maioria das barragens, esses materiais não são suficientes ou não apresentam propriedades adequadas aos fins. Nesses casos, é necessário estudar e explorar áreas de empréstimo, sendo que os materiais dessas áreas devem atender aos requisitos das especificações da obra, cabendo destacar que, muitas vezes, o projeto deve se adequar à disponibilidade de materiais e ao cronograma imposto pelas necessidades e clima. A exploração de áreas de empréstimo provoca a degradação do local e, na sua escolha, deve-se levar em conta os custos com a recuperação da área, que, normalmente, não são baixos. Uma alternativa para se evitar esses custos é utilizar áreas de empréstimo que ficam a montante do empreendimento e que serão cobertas futuramente

pelo reservatório de água formado pela barragem. Faz-se, no entanto, necessário avaliar se tal área não gerará, no futuro, impactos negativos no próprio reservatório.

Os materiais existentes nas áreas de empréstimo geralmente apresentam variações no teor de umidade natural em função da época do ano. Na elaboração do cronograma de construção, na programação do uso desses materiais e na escolha dos equipamentos utilizados na execução do aterro, deve-se levar em consideração essa variação. Portanto, deve-se programar a execução das escavações e a formação dos estoques de materiais de modo a se prever o uso dos solos de acordo com o cronograma de lançamento dos aterros e com os requisitos técnicos previstos. O material obtido nas áreas de empréstimo também apresenta, em geral, teor de umidade fora das faixas especificadas para a compactação. Nesses casos, a umidade deverá ser corrigida até que sejam conseguidos os valores especificados, utilizando-se métodos adequados.

A indicação de uma área de empréstimo não significa que todo o material dessa área seja adequado para a construção dos aterros e somente os solos adequados poderão ser utilizados. Materiais com características insatisfatórias, como raízes, grama ou outros materiais orgânicos perecíveis ou prejudiciais aos aterros, não poderão ser utilizados e deverão, na medida do possível, ser estocados para a própria recuperação da área.

b) Materiais utilizados nos aterros de barragens

O material utilizado em aterros de barragens é muito variado, pois depende da disponibilidade e de sua finalidade na obra. Os materiais utilizados na vedação devem apresentar melhores características de permeabilidade e, portanto, uma fração mínima de argila, normalmente, pelo menos, 15%. No caso de uso de solos profundamente intemperizados agregados, como é o caso dos solos residuais maduros, a textura deve ser analisada nas condições de utilização na obra, o que corresponde, geralmente, à não utilização de agentes desagregadores/defloculadores, como os defloculantes químicos e o ultrassom. A preferência é pela utilização de solos coluvionares e residuais maduros, que texturalmente se enquadram como argilosos, argilo-siltosos, silto-argilosos, argilo-silto-arenosos ou areno-silto-argilosos, mas tem-se relato da utilização de solos residuais jovens em vários empreendimentos. Guimarães *et al.* (2003) verificaram que o uso de solos residuais jovens em barragens foi feito pela dificuldade de se encontrar materiais convencionais, solo coluvionar e residual maduro nas proximidades das obras e pela necessidade de se utilizar, obrigatoriamente, materiais das escavações. Os diversos empreendimentos que usaram esses materiais mostraram que eles foram adequados, pois apresentam boas propriedades, necessitando-se, no entanto, de estudos e cuidados especiais. A vantagem da utilização de colúvios e solos residuais maduros, solos profundamente intemperizados, é a de que as partículas de argila se encontram em estado agregado e, por isso, em situação de difícil migração. Outro aspecto positivo é o fato de apresentar baixa anisotropia devido à restrição que se impõe pela agregação à orientação das partículas de argila, o que contribui para limitar a permeabilidade horizontal. A macroporosidade existente nesses solos em estado natural é, geralmente, fechada durante o processo de compactação. No que tange à capilaridade/sucção, a condição de sucção elevada vai prevalecer para umidades usualmente não muito altas, o que minimiza a energia interna resistente à compactação. Para os solos residuais jovens, solos pouco intemperizados, essa sucção e a possibilidade de orientação das partículas dependerão da composição químico-mineralógica do solo e

do estado de aglomeração de partículas no momento de colocação na pista para ser compactado, devendo as propriedades químicas da água eventualmente usada nos ajustes de umidade do solo ser avaliadas, pois podem facilitar a orientação das partículas durante o processo de compactação.

Na construção da barragem, as características dos solos solicitadas no projeto dependem do seu local de aplicação, sendo que, no contato com a fundação em rocha, nas áreas correspondentes aos núcleos argilosos e às bases das trincheiras de vedação, normalmente, são utilizados os solos mais plásticos, no ramo úmido, de modo a permitir uma boa aderência no contato maciço-fundação. Uma importante característica que os materiais aplicados em cada seção da barragem devem apresentar é a homogeneidade das propriedades, sendo essencial que, antes do início da execução dos aterros compactados do núcleo da barragem, seja realizado um estudo estatístico para a verificação da homogeneidade e uniformidade do produto final e o ajuste necessário no processo de execução a partir de aterro experimental.

c) Equipamentos

Antes de se utilizar qualquer equipamento de compactação, estes devem ser submetidos a testes na execução do aterro experimental para verificar a sua eficiência. Conforme já visto, devem ser avaliados, principalmente, a velocidade de compactação e o número de passadas, pois esses fatores influenciam as propriedades do solo compactado. Os equipamentos de compactação são especificados em função do tipo de solo utilizado. No entanto, no Brasil, observa-se pouca variação dos equipamentos especificados e utilizados na compactação de aterros de barragens, predominando rolos com patas curtas e pé de carneiro. A Tabela 2 apresenta alguns exemplos dos equipamentos descritos nas especificações técnicas de barragens no Brasil.

Tabela 2 – Exemplos de características especificadas para os equipamentos de compactação dos aterros de barragens

Barragem	Tipo de Equipamento			
UHE Batalha	Rolo autopropelido com patas tronco-cônicas		Compactadores de impacto com pata	
	Peso: 6000 kgf/m	Velocidade: < 5 km/h	Peso: 12000 kgf/m	Velocidade: 15 a 20 km/h
UHE Foz do Chapecó	Rolo com patas ou pé de carneiro, cuja experiência em aterros semelhantes mostre que ele seja capaz de atingir os graus de compactação especificados.			
UHE Foz do Rio Claro	Rolo com patas ou pé de carneiro, cuja experiência em aterros semelhantes mostre que ele seja capaz de atingir os graus de compactação especificados.			
UHE Baguari	Rolo com patas ou pé de carneiro, cuja experiência em aterros semelhantes mostre que ele seja capaz de atingir os graus de compactação especificados.			
UHE São Salvador	Rolo autopropelido com patas tronco-cônicas		Compactadores de impacto com pata	
	Peso: 6000 kgf/m	Velocidade: < 5 km/h	Peso: 12000 kgf/m	Velocidade: 15 a 20 km/h

Quando os rolos forem operados em série ou em paralelo, deverão possuir as mesmas características de operação, dimensões e pesos. Todos os rolos deverão ser equipados com hastes ou barras de limpeza, projetadas e instaladas para evitar o acúmulo de terra entre as patas, o que limita a compactação. O eixo de cada cilindro do rolo deverá ser alinhado de maneira a permitir perfeito contato com a superfície do aterro.

Em alguns locais inacessíveis aos rolos, junto a paredes ou muros de concreto e em locais de instalação de instrumentação, não é possível utilizar os rolos especificados na Tabela 2. Nesses casos, são utilizados os compactadores mecânicos manuais, sendo que eles devem produzir pesos específicos equivalentes àqueles obtidos com a utilização dos rolos especificados para o restante da obra. Para o uso de compactadores manuais, a espessura da camada é limitada, geralmente, a 15 cm. Nos contatos com o muro de concreto e fundação em rocha, é comum, também, a utilização de passadas de pneus de pá-carregadeira com a concha cheia de solo ou rocha.

d) Execução do aterro

Hoje, com a tecnologia disponível, os veículos transportadores e as máquinas usadas na escavação da área de empréstimo, embora ainda não seja frequente no Brasil, deveriam ser dotadas de GPS e conectadas via satélite, em tempo real, aos escritórios de projeto e fiscalização e à equipe de acompanhamento de execução do aterro, que, por sua vez, com a execução da obra inteiramente planejada e informatizada, já encaminharia o condutor do veículo exatamente para a estaca de lançamento do material para ser espalhado.

O lançamento do solo no aterro deve atender os alinhamentos, greides, dimensões e declividades indicadas no projeto executivo. Durante as operações de lançamento e espalhamento, deverá haver controle topográfico permanente. Deverá ser feito o nivelamento da superfície das praças de compactação de modo a permitir o controle da espessura das camadas compactadas e para manter a declividade adequada, com inclinações suaves, geralmente, declividade mínima de 2%, podendo chegar a 5%, que permitam uma drenagem superficial adequada das águas de chuva. As superfícies deverão ser inclinadas de tal forma que as águas superficiais não sejam conduzidas às transições e aos filtros de areia, evitando-se, com isso, possíveis contaminações.

As espessuras das camadas lançadas deverão ser previamente demarcadas por colocação de cruzetas, adequadamente espalhadas pela praça, a fim de facilitar o lançamento. Os solos lançados na praça de compactação deverão estar isentos de detritos vegetais, matéria orgânica ou outros materiais deletérios.

O material lançado deverá ter teor de umidade durante o lançamento que permita o tráfego normal do equipamento e que, como resultado da compactação, produza um material de aparência homogênea, maciça, satisfazendo as condições de permeabilidade estabelecidas. As operações de lançamento e espalhamento devem ser feitas paralelamente aos eixos longitudinais dos maciços. Somente em casos excepcionais, após avaliação do projetista, poderá ser de outra forma.

Tanto quanto possível, os equipamentos de transporte deverão ser dirigidos de maneira que evitem passar pelos mesmos caminhos nas praças de lançamento, trafegando sobre o material solto lançado. Quando essa operação se tornar impraticável, deverão ser construídos aterros provisórios de material solto para suprir essa necessidade (espessura varia de 0,4 a 1 m), que serão, posteriormente, removidos.

Antes do lançamento de cada camada, aquela previamente compactada deverá ser escarificada com grade de disco e realizado o umedecimento da superfície para garantir aderência adequada. O lançamento de solo junto às estruturas de concreto será realizado após a limpeza e o tratamento das superfícies dessas estruturas para melhor aderência do solo. O material lançado e espalhado deverá ser gradeado previamente à compactação até a profundidade total da camada. Poderá ser necessário o uso de escarificador das motoniveladoras. O gradeamento deverá continuar até que: a) todo o material esteja homogeneizado; b) a pré-compactação provocada pelo tráfego de transporte seja rompida; c) todo o material com torrões que tiver sido lançado e espalhado seja quebrado e, se necessário, sua umidade corrigida até a profundidade total da camada antes da compactação.

A espessura das camadas, após o lançamento e espalhamento, não deverá exceder a 25 cm, incluindo-se o material solto remanescente da camada anterior. Esse valor poderá variar em função do material, dos equipamentos de compactação utilizados e dos graus de compactação obtidos em aterros experimentais ou no corpo do aterro. Portanto, a espessura deverá ser confirmada em pista experimental específica.

A operação de compactação será iniciada após o lançamento, espalhamento, correção de umidade e nivelamento das camadas. Cada passada do rolo compactador deverá cobrir total e uniformemente a área a ser compactada. A compactação deve ser realizada de maneira sistemática, ordenada e contínua, com os rolos compactadores se movendo em direção paralela ao eixo da barragem. Na compactação de uma área, as passagens sucessivas do rolo deverão estar separadas por distâncias iguais às existentes entre as filas consecutivas de patas dos rolos de modo a dar uniformidade à compactação como um todo. Cuidados especiais deverão ser tomados para que seja garantida uma perfeita ligação entre camadas contíguas. Hoje, em alguns países, o número de passadas do rolo já vem sendo controlado por GPS e via satélite. Nesse caso, na cabine onde fica o operador do rolo e no escritório de projeto e acompanhamento, existe um visor que informa, por meio de cores, o número de passadas em cada ponto, e, quando o local já se submeteu ao número de passadas especificado, a área assume a cor especificada para tal, por exemplo, a cor verde.

A interrupção dos trabalhos de lançamento e compactação por um intervalo de tempo longo configura a formação de juntas de construção. Para esse período de interrupção, a superfície do aterro compactado deverá ser regularizada, selada convenientemente e lançada, sobre ela, uma camada de material solto, normalmente de 50 cm de espessura. Esse procedimento é necessário para se evitar ressecamento e trincas do material compactado. Essas trincas, admitidas quando se usa solos finos lateríticos em pavimentação, são proibitivas no caso de barragens de terra por induzirem caminhos preferenciais para o fluxo de água. O teor de umidade do solo da camada de proteção deverá ser mantido sempre acima do seu valor ótimo. Por ocasião da retomada dos trabalhos de compactação, toda a camada de proteção deverá ser removida e, depois, deverá ser feita a remoção de camadas já compactadas ou parte delas caso se apresentarem ressecadas, fissuradas ou com fendas. Observa-se, portanto, que o conhecimento do efeito da atuação da capilaridade/sucção na contração do solo assume grande relevância nos projetos de barragens de terra.

Desníveis entre partes do aterro com mais de 10 (dez) camadas também são considerados como juntas de construção. O talude de junta transversal ao eixo longitudinal do

maciço deverá ter declividade máxima de 1V:2,5H e o talude de junta longitudinal deverá ter declividade máxima de 1V:2H. A altura do maciço com junta deverá ser determinada pelo projeto.

Se, durante os trabalhos, anunciarem-se chuvas intensas, deverá ser realizada, rapidamente, nos maciços, uma compactação superficial de selagem, com rolo pneumático ou outro equipamento de rolos lisos. No reinício dos trabalhos, essa camada deverá ser escarificada e tratada antes da colocação da camada sobrejacente. O tratamento consiste em homogeneizar a textura do solo e o seu teor de umidade, utilizando-se grades de discos rebocadas por trator agrícola. Nessa fase, dependendo da finalidade da parte do aterro que está sendo executada, se o núcleo ou espaldar, e do tipo de solo, se profundamente intemperizado e agregado ou pouco intemperizado e não agregado, será recomendável verificar se a textura do solo não foi alterada em relação ao estado natural. Se for um material de espaldar, no qual, geralmente, o mais relevante é o comportamento mecânico, a degradação estrutural dos solos agregados será prejudicial em relação ao comportamento previsto em projeto. Se for um material de núcleo, essa mesma desagregação tenderá a reduzir a permeabilidade, melhorando, portanto, o seu desempenho para a finalidade prevista. Contudo, tanto nesse caso como no referente ao uso de material pouco intemperizado, faz-se necessário ampliar a atenção quanto à maior possibilidade de orientação das partículas de argila.

Durante a execução do aterro, em função de algum tipo de variabilidade que possa ocorrer durante a construção, como alteração das características do solo, espessura da camada, umidade, mudança do equipamento de compactação, essas novas condições deverão ser testadas pela construção de aterros experimentais. Caso os valores determinados para o grau de compactação não sejam atingidos, deverão ser adaptados os métodos de execução da compactação, bem como a espessura da camada. Caso se trate de solos agregados ou formando aglomerações, é sempre relevante que a análise seja feita em termos de porosidade e não, simplesmente, em termos de grau de compactação, pois, apesar de o grau de compactação ser pior, a porosidade pode ser menor e a distribuição de poros, melhor. Em outras palavras, alguns agregados possuem poros internos não conectados que contribuem para o menor grau de compactação, mas não afetam a porosidade, que condiciona o comportamento hidromecânico, ou seja, os poros entre os agregados. É essa porosidade entre agregados que deve ser avaliada e verificado se é maior ou menor que a especificada.

No caso de ocorrência de camadas que apresentem superfícies internas de laminação, elas deverão ser revolvidas. A laminação é função da energia aplicada, da quantidade de água no solo e das características químico-mineralógicas das partículas, e é prejudicial para o comportamento hidromecânico do solo, pois causa a diminuição da resistência ao cisalhamento e aumento da permeabilidade nos planos onde ocorre a laminação. Nesses casos, a maioria das especificações recomendam o tratamento e a recompactação da camada. No entanto, a recompactação, dependendo do tipo de solo, pode alterar suas propriedades, conforme já explicitado neste item. O ideal é a retirada das camadas com laminação e a substituição no material. Devem ser removidas, também, quaisquer camadas que se apresentem onduladas devido à deformação plástica causada pela passagem dos equipamentos de terraplenagem sobre os solos com excesso de umidade (borrachudos).

Se a superfície de qualquer camada de aterro, antes do lançamento de uma nova camada, apresentar-se muito seca, de tal modo que prejudique a aderência com a camada sobrejacente, a superfície em questão deverá ser irrigada e revolvida adequadamente até uma profundidade que possa assegurar boas condições de ligação. Ao contrário, se tal superfície apresentar-se muito úmida, a camada deverá ser revolvida até apresentar umidade adequada à compactação. Qualquer camada que, após ser trabalhada, como exposto anteriormente, ainda não apresentar condições adequadas, deverá ser removida e substituída.

Para solos das fundações e solos argilosos dos maciços compactados, constatando-se, após a compactação, que a superfície de uma camada ou área está lisa, ela deverá ser escarificada previamente ao lançamento de uma nova camada. Após a escarificação, deverão ser feitos o destorroamento, a correção de umidade se necessária e a homogeneização do material escarificado para a melhor ligação da camada com a sobrejacente.

e) Controle de qualidade

O controle de qualidade da execução de aterros de barragens é realizado utilizando-se ensaios geotécnicos no campo e no laboratório com os materiais de construção. O controle visa obter um material compactado homogêneo e com as características especificadas no projeto executivo. Cada camada individual deverá apresentar homogeneidade quanto ao teor de umidade e ao grau de compactação, principalmente, entre seu topo e sua base. Assim, deverão ser verificados, periodicamente, em geral, a cada 10 ensaios de compactação, os gradientes de compactação ao longo da espessura das camadas. São aceitáveis gradientes médios máximos de 3% entre topo e base desde que os resultados no topo e na base atendam aos limites de grau de compactação estabelecidos.

O controle da compactação *in situ* é feito pelo acompanhamento permanente e pela inspeção visual das diversas operações de escavação, lançamento, espalhamento, umidificação, homogeneização e compactação, e confirmado pelos ensaios executados. Na inspeção visual, deve-se observar e avaliar:

- a) a escarificação, o destorroamento, a correção da umidade e a homogeneização do solo da superfície da camada compactada, suporte da camada seguinte;
- b) a distribuição, nas áreas de trabalho, dos equipamentos de transporte, espalhamento e compactação, para o controle da uniformidade da compactação;
- c) o tipo, a qualidade e as condições de umidade do material lançado;
- d) os serviços de remoção de raízes, fragmentos de madeira, detritos e outros materiais putrescíveis ou inadequados nas áreas de trabalho;
- e) gradeamento do material lançado para destorroamento e homogeneização do teor de umidade;
- f) o espalhamento e o controle topográfico rigoroso da espessura de camada de solo a ser compactada;
- g) as condições e características dos equipamentos de compactação, como peso, comprimento das patas, espaçamento entre os tambores, etc.;
- h) velocidade de operação dos rolos compactadores;
- i) o número de passadas dos rolos e a cobertura adequada da faixa durante a compactação;
- j) a espessura da camada após a compactação;

- k) a ocorrência de camadas ressecadas, fissuradas ou com fendas;
- l) as condições de trabalhabilidade do solo e a verificação da ocorrência de laminação, “borrachudo”, do revolvimento do solo pelas patas dos rolos, etc.;
- m) a ligação entre camadas de mesmo material ou de materiais diferentes;
- n) as inclinações das superfícies dos maciços do modo que permitam uma drenagem adequada das águas de chuva.

Cabe destacar que várias dessas observações e avaliações visuais poderão ser realizadas por automação dos sistemas operacionais, tornando-as mais rápidas e quase sempre mais seguras. Como mencionado no item 3.2.2, existe o que se chama Controle de Compactação Inteligente (Intelligent Compaction Control - ICC), que consiste em um contínuo controle e monitoramento da compactação, quando uma série de parâmetros são medidos em tempo real, já informando sobre a qualidade da camada compactada e se os parâmetros desejados foram atingidos (e.g. Hossain *et al.*, 2006; Anderegg *et al.*, 2006; Cai *et al.*, 2017, Kodikara *et al.*, 2018).

No campo, deve-se verificar, rotineiramente, o grau de compactação e o teor de umidade das camadas compactadas. A metodologia especificada e a frequência variam para cada empreendimento. A Tabela 3 apresenta alguns exemplos de metodologias e frequências especificadas para algumas barragens no Brasil. O controle é realizado após a raspagem de aproximadamente 5 cm de solo compactado no local do ensaio. Normalmente, o controle de compactação é efetuado utilizando-se o desvio da umidade (Δw , %) e a determinação do grau de compactação (GC, %).

A obtenção rápida do grau de compactação (GC%) e do desvio de umidade (Δh (%)) para agilizar o processo construtivo das barragens é feita, normalmente, pelo método de Hilf, correlacionando-se, previamente, seus resultados com os do ensaio Proctor Normal. Devem ser estabelecidos sistemas de controles estatísticos de qualidade por meio de “cartas de médias e amplitudes” de maneira que a aprovação da compactação admita tolerâncias compatíveis com a qualidade desejada. Esses estudos poderão fornecer subsídios para a determinação de novas rotinas de verificação da compactação e, eventualmente, para programar modificações de seus métodos e controle de construção, visando a maior eficiência nas operações dos equipamentos. A faixa de desvio dos teores de umidade, dentro da qual deverão se situar todos os resultados dos ensaios de controle, depende das características do material adotado e dos parâmetros geotécnicos especificados para a obra. A Tabela 4 apresenta as faixas de desvio dos teores de umidade, dentro das quais deveriam se situar os resultados dos ensaios de controle de compactação, utilizadas em algumas barragens no Brasil. Os desvios de umidade admitidos são, geralmente, função da forma da curva de compactação e de como as variações de peso específico a ela atreladas interferem no comportamento. Geralmente, curvas de compactação mais planas permitem maiores faixas de umidade, pois a tendência é que, se a umidade intervir pouco no peso específico, intervirá pouco no comportamento hidromecânico. Outro aspecto importante é que, se os estudos de laboratório foram realizados sobre amostras secas previamente, é provável que a umidade de campo será deslocada para o ramo úmido em relação aos resultados de laboratório e, talvez, até seja isso que leve, muitas vezes, às especificações de execução situarem as faixas de umidade no ramo úmido.

Tabela 3 – Exemplos de metodologias e frequências adotadas no controle de compactação dos aterros de barragens.

Barragem	Metodologia	Frequência
UHE Batalha	Hilf	Um ensaio por cada camada compactada desde que ela não exceda 200 m ³ ; caso contrário, deverão ser executados, pelo menos, dois ensaios.
UHE Foz do Chapecó	Proctor-Hilf	Um ensaio para cada camada compactada. Caso a camada compactada tenha mais de 1.500 m ³ , serão executados, pelos menos, três ensaios.
UHE Foz do Rio Claro	Proctor-Hilf	Um ensaio para cada camada compactada. Caso a camada compactada tenha mais de 1.500 m ³ , serão executados, pelos menos, três ensaios.
UHE Baguari	Hilf	Um ensaio para cada camada compactada e, no mínimo, a cada 1.500 m ³ de material compactado.
UHE São Salvador	Hilf	Dois ensaios para cada camada compactada. Caso a camada compactada tenha mais de 1.000 m ³ , será executado, pelo menos, mais um ensaio.

Tabela 4 – Exemplos de faixas de umidades adotadas em controle de compactação dos aterros de barragens

Barragem	Camadas de Solo	Contato com estruturas de concreto e no contato do núcleo argiloso com a rocha ou solo de fundação
UHE Batalha	- 1,0% a +2,0%	+ 1,5% a + 3%
UHE Foz do Chapecó	0,90 w _{ótima} a 1,10 w _{ótima}	0 a + 3%
UHE Foz do Rio Claro	0,975 w _{ótima} a 1,015 w _{ótima}	+ 1,5% a + 3%
UHE Baguari	- 1,0% a +2,0%	+ 1,5% a + 3%
UHE São Salvador	- 2,0% a +2,0%	+ 1,0% a + 3%

O desenvolvimento dos trabalhos de compactação no campo poderá indicar a conveniência ou a necessidade de se variar a faixa de desvio especificada para se conseguir compactação adequada das camadas. Nesses casos, é necessário realizar estudos, reavaliando-se os resultados obtidos na execução do aterro e as características das áreas de empréstimo e, preferencialmente, utilizando-se aterros experimentais. A correção do teor de umidade por secagem ou umedecimento deverá ser efetuada nas próprias áreas de exploração dos materiais terrosos. Nas áreas de compactação do aterro, serão permitidas somente pequenas correções na umidade, da forma e com o tipo de equipamento adequado para esse tipo de serviço. Toda camada já lançada e compactada deverá ser mantida dentro dos limites de teor de umidade especificados até o lançamento da camada subsequente. As camadas que, depois de compactadas, apresentarem teor de umidade acima do especificado, deverão ser revolvidas até se enquadrarem na faixa de umidade especificada. Ao contrário, as camadas compactadas que apresentarem teor de umidade abaixo do

especificado deverão ser retrabalhadas e recompatadas, conforme descrito anteriormente. Lembrar sempre que a recompatação deve ser avaliada, pois, dependendo do tipo de solo, essa prática pode alterar suas propriedades e seu comportamento. Deve-se também avaliar, quando a faixa de umidade não tiver sido alcançada, se o grau de compactação o foi, e, se o comportamento corresponde ao especificado. Tal averiguação é importante, pois em alguns casos, especificidades do solo, como porosidade de agregados, quando for o caso, e composição mineralógica ou preparação das amostras para os ensaios de laboratório que conduziram à especificação da faixa de umidade de campo apresentam alguma discrepância em relação ao material usado na camada do aterro executada.

A obtenção da massa específica aparente seca *in situ* em aterros de barragem, normalmente, é feita pelo método de cravação do cilindro biselado, podendo ser utilizadas outras metodologias. Os graus de compactação mínimos e máximos aceitáveis dependem das características do material adotado e dos parâmetros geotécnicos especificados para a obra. A compactação deve ser a mais uniforme possível, sendo preferível a obtenção de valores de grau de compactação próximos da média em detrimento de valores elevados. Os graus de compactação utilizados em algumas barragens no Brasil ficam em torno de 96% para o mínimo, 98% como média, e 102% como máximo, tendo o Proctor Normal como referência.

Além do controle do grau de compactação e da umidade, rotineiramente, são abertos poços de inspeção nos maciços, com seção quadrada de 1,5 m de lado, para a análise visual e tátil de suas paredes e, sempre que houver necessidade, para a extração de amostras indeformadas e verificações de juntas de construção e regiões do maciço cujas superfícies ficaram expostas ao tempo por longos períodos. No caso de extração de amostras indeformadas, elas devem receber identificação quanto à sua orientação em relação ao eixo da barragem e indicação do topo e da base. Essa orientação pode ser útil na definição da montagem dos ensaios a que se destinam, devido à possibilidade de alterações estruturais do solo em função da direção de trânsito dos rolos compactadores. Uma vez desempenhadas essas funções, os poços serão fechados, compactando-se conforme as determinações da equipe responsável pelo controle tecnológico de qualidade. Outras inspeções poderão ser determinadas pela equipe responsável pelo controle tecnológico de qualidade.

5.2 Em pavimentos

As estruturas de pavimento podem ser classificadas como rígidas, flexíveis e semi-rígidas ou semiflexíveis. Atualmente, existe a tendência de se usar as nomenclaturas: pavimentos de concreto de cimento Portland, pavimentos asfálticos e pavimentos permeáveis, respectivamente.

A compactação na execução de estruturas de pavimentos é uma prática corriqueira, feita em função das disponibilidades de materiais que atendam às exigências de comportamento mecânico inerente às solicitações do tráfego característico da rodovia e com o uso de técnicas adequadas ao tipo de solo. As especificidades do tipo de solo estão, geralmente, relacionadas à evolução e/ou formação geológica no local da área de empréstimo e, em se tratando do subleito, do local onde se deseja a implantação das estruturas de pavimento.

Nos pavimentos de concreto de cimento Portland, a espessura da camada do revestimento é fixada em função da resistência à tração sobre flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. Usualmente, designa-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos rodoviários se comparada à capa de concreto. No caso geral, o pavimento de concreto de cimento Portland é constituído das camadas de reforço do subleito, sub-base e da placa de concreto de cimento Portland.

A estrutura de pavimentos flexíveis, geralmente, é composta da base para o topo por uma sub-base, base e revestimento assente sobre a fundação, que é denominada de subleito, podendo incluir o seu reforço (Figura 8). Dependendo da finalidade da obra, das características do subleito e do volume de tráfego, a estrutura de pavimento pode ser composta apenas por parte dessas camadas. Tem-se, ainda, que, se a camada obtida no projeto for mais espessa que a admitida para o material e equipamento disponível, ela deverá ser dividida em subcamadas para fins de compactação.

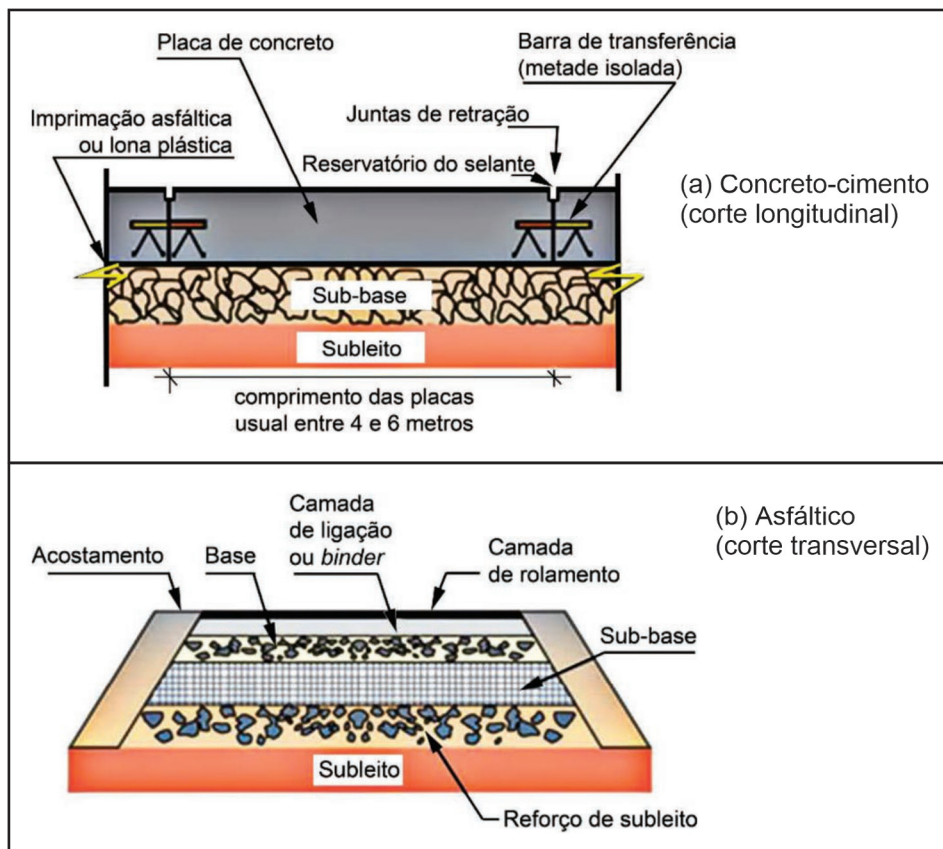


Figura 8 – Seções típicas de pavimentos rígidos e flexíveis (adaptado de Rodrigues, 2022)

Nos pavimentos flexíveis, a distribuição da estrutura de pavimentos em camadas, cuja rigidez diminui do topo para o subleito, objetiva otimizar a distribuição dos esforços e, por consequência, o custo, pois, quanto maior a rigidez da camada, maior a dissipação da energia aplicada pelos veículos, fazendo com que as camadas mais rígidas superiores diminuam as tensões induzidas nas inferiores. Já nos pavimentos rígidos, como ocorre a distribuição dos esforços oriundos dos veículos sobre as próprias placas de concreto, o objetivo desta, conjuntamente com a sub-base, é, usualmente, distribuir as tensões, impondo menores esforços sobre o subleito ou seu reforço.

No contexto dos pavimentos flexíveis, o revestimento é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, e é destinada não só a resistir aos esforços que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento, como também melhorando as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança. A base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos por meio do revestimento. A sub-base é uma camada que atua, ao mesmo tempo, como complementar à base e como corretiva do subleito, sendo, em alguns casos, dispensável em função do volume de tráfego, das características da via e das características do subleito. Para um dado subleito, que é a fundação do pavimento, que possua baixa resistência aos esforços verticais a ele transmitidos, pode-se executar uma camada complementar de solo compactado, denominada de reforço de subleito, com melhor capacidade de suporte, possibilitando reduzir os esforços para níveis aceitáveis pelo subleito natural. Com a ampliação do número de eixos e da carga por eixo dos veículos transportadores de carga, fazem-se hoje necessárias análises complementares sobre a influência do bulbo de tensões gerado pelo conjunto de eixos sobre o desempenho da estrutura de pavimento, uma vez que camadas mais espessas do subleito serão mobilizadas.

No que se refere à pavimentação, como já visto em termos gerais, o comportamento de um determinado material após a compactação depende, fundamentalmente, da natureza do solo, juntamente com outros fatores, tais como o teor de umidade, a qualidade da água quando incorporada e a energia de compactação. Um exemplo disso são os solos tropicais. No estado natural, esses solos são porosos, permeáveis, podendo até mesmo ser colapsíveis. Todavia, quando compactados, eles podem adquirir boa resistência e baixa permeabilidade, sem perda significativa de capacidade de suporte ao serem imersos em água (Godoy *et al.*, 1996), em especial quando compactados próximo à condição ótima, situação em que a sucção matricial é geralmente baixa.

Os solos tropicais são bastante utilizados na construção de pavimentos no Brasil, e alguns detalhes sobre seu comportamento quando compactados já foram mencionados ao longo deste capítulo. Como informações adicionais, podem ser comentados os resultados publicados pela Lyon Associates (1971), que mostram que os fatores que influenciam as propriedades de compactação dos solos tropicais; especificamente, os solos lateríticos, podem ser divididos em dois grupos: o primeiro é ligado à gênese dos solos e o segundo se relaciona aos seus métodos de pré-tratamento antes dos ensaios. Esses fatores são: (a) a textura: o fator genético é mais importante; (b) a transformação da haloisita hidratada em metahaloisita devido à secagem ao ar e com maior intensidade em estufas; (c) a localização das amostras no perfil de solo em termos de profundidade; e (d) o atrito dos

pedregulhos lateríticos concrecionados durante a compactação e em função do grau de evolução no processo de laterização. Para uma dada energia de compactação, é observado, mais para os solos lateríticos finos que para os pedregulhosos, que a secagem resulta sempre em massas específicas secas aparentes mais elevadas e teores de umidade ótimos mais baixos. Esse comportamento geralmente ocorre quando os agregados ou as concreções são fragilizados pelo processo de secagem. No entanto, nos casos em que a secagem promove mais estabilidade às cimentações, o efeito pode ser o contrário.

Em vários casos, ao não se atingir o grau de compactação desejado, é feita a abertura e o gradeamento do solo do trecho e a sua recompactação. No entanto, no caso dos solos lateríticos pedregulhosos, essa prática pode ser nociva em caso de fragilidade dos agregados, sendo recomendável que se faça, antes, uma averiguação do comportamento do solo no estado em que ele se encontra, pois a recompactação provoca um incremento do teor de finos por destruição da textura do solo sem aumentar, no entanto, a massa específica seca nem a capacidade de suporte de maneira significativa, por vezes, até piorando o comportamento mecânico. Outro aspecto diz respeito ao fato de que, ao tornar a matriz do solo mais fina, também a torna mais sensível ao efeito da sucção. Considerando-se a particularidade da distribuição de poros dos solos lateríticos e o fato de que os poros presentes no interior dos agregados e microagregados não interferem ou interferem pouco no comportamento mecânico, é recomendável, antes de se abrir e recompactar a camada, que se faça uma avaliação da porosidade e distribuição de poros em relação ao material estudado. As análises em termos de peso específico não permitem esse tipo de avaliação.

Os pavimentos permeáveis, por possuírem uma dupla função, a de atender às solicitações e permitir a drenagem da água, apresentam peculiaridades distintas das convencionais. Existem, nessa categoria de pavimentos, dois tipos: os pavimentos drenantes e os pavimentos permeáveis propriamente ditos. Os pavimentos drenantes seguem as premissas dos pavimentos flexíveis em geral, e apenas se constituem de uma capa drenante sobre a capa impermeável convencional, sendo a água infiltrada conduzida a drenos laterais. Já os pavimentos permeáveis propriamente ditos, constituídos por blocos intertravados, enquadram-se como pavimentos semirrígidos ou semiflexíveis e, geralmente, levam a água infiltrada até o subleito, fazendo com que as análises de comportamento em função das variações de sucção ganhem maior importância. Camapum de Carvalho *et al.* (2012) discutem esse tipo de pavimento de modo mais amplo.

De uma maneira geral, as recomendações básicas para a compactação de solos usados em pavimentos são, basicamente, as mesmas que foram comentadas ao longo deste capítulo, em especial, no item relacionado à compactação de aterros. No caso dos pavimentos, existem parâmetros importantes, como o módulo de resiliência, o índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR) e a expansão. De qualquer modo, várias informações sobre o comportamento dos solos em relação a esses parâmetros já foram, também, previamente discutidos ou serão tratados em capítulo específico sobre estruturas de pavimento no contexto dos solos não saturados. O leitor deverá associar essas informações à elaboração do projeto e à execução da obra.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

Ao longo deste capítulo, foram mostrados detalhes de comportamento de solos compactados. Foi dada ênfase à importância de estar atento às propriedades finais que o solo adquire após a compactação em vez de, simplesmente, buscar uma densidade seca máxima estipulada em projeto. Também, procurou-se ressaltar o fato de que, em uma obra, o solo é compactado em condição não saturada, assim permanecendo, se não em toda, mas em boa parte de sua vida útil, refletindo essa condição em maior rigidez e resistência. Por isso, há, atualmente, uma tendência em se buscar soluções que mantenham os solos compactados em condição de não saturação durante a vida útil da obra, permitindo, assim, aos projetistas aplicarem os conhecimentos sobre o efeito da sucção no comportamento do solo, especialmente em sua resistência e deformabilidade, implicando menos custos na execução e manutenção da obra. Especificamente, no caso de pavimentos e barragens, o estabelecimento de fatores de resistência relacionados à sucção do solo poderá ajudar no projeto de aterros, base e sub-base, que terão uma relação custo-benefício melhor, pois essas obras estarão mais próximas das condições de execução e daquelas que terão ao longo da sua vida útil, sendo relevante a consideração da faixa de umidade de equilíbrio ao longo do tempo. As condições saturadas dessas obras são, potencialmente, as piores em termos de resistência e deformabilidade e devem ser consideradas em projetos com potencial de ocorrência dessa situação, como é o caso das barragens. Este capítulo também procurou mostrar que a estrutura ou o arranjo dos grãos de um solo compactado tem uma grande importância na determinação do seu comportamento, particularmente, o mecânico quando na condição não saturada e o hidráulico quando na condição saturada.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2021a) – T 99, Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.). Disponível de forma digital em <https://store.transportation.org/Item/PublicationDetail?ID=4617>. Acesso em 14/03/2022.

AASHTO (2021b) - T 180, Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.). Disponível de forma digital em <https://store.transportation.org/Item/PublicationDetail?ID=4625>. Acesso em 14/03/2022.

ABNT - (2016). Solo – Ensaio de compactação – NBR 7182. Rio de Janeiro, Brasil, 10pp. incorpora a Errata 1, de 22.01.2020. Disponível de forma eletrônica via catálogo da ABNT, em <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=bThvM2pta25BYXVNResySIR-nR1RMbWhpVEJsemNUUU1CeWdnd0pNSVhYWT0=>. Acesso em 14/03/2022.

ABNT (2020) - Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos – NBR 16843. Disponível de forma eletrônica via catálogo da ABNT, em <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=bXErMnRNL3A4a01yaElaalBFWTFFQjd-6cWx0LzJlQjQ2REJxT1F0Y0gvUT0=>. Acesso em 14/03/2022.

ABNT (2021) – Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Errata 1 de 29.10.2021 corrige a ABNT NBR 16840:2020. Disponível no catálogo ABNT, em <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=V3VHdlhib3JySDd3cjZ5L2NU-dXJYbWpsOFRlemQ4bHcyKytyZDREK2kvcz0=#>. Acesso em 14/03/2022.

ABOU DIAB, A., NAJJAR, S. S., SADEK, S., TAHA, H., JAFFAL, H., & ALAHMAD, M. (2018). Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay. *Soils and Foundations*, 58(2), 462-480.

AGUIAR, L.A. (2010). Contribuições para a Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados para uso em Barragens. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127 pp.

AL-KHYAT, S. (2018). An experimental investigation of the collapse behaviour of an unsaturated compacted soil along the static compaction curves. 2018. Tese de Doutorado. Cardiff University.

ANDEREGG, R., VON FELTEN, D. A., & KAUFMANN, K. (2006). Compaction monitoring using intelligent soil compactors. In *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age* (pp. 1-6).

AQUINO, F.R.; GUIMARÃES, R.C.; AGUIAR, L.A.; MIRANDA, C.O.P.; CABRAL, M.P. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2008). Influência dos métodos de compactação e preparação de amostras no comportamento da curva de compactação de solos tropicais. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Búzios-RJ, pp. 1755-1762. CD-ROM.

ARKADIUSZ, K., JAN, M., & SEBASTIAN, B. (2022). Monitoring soil state during compaction process using a vibrating rammer and a plate compactor. *Journal of Terramechanics*, 100, 61-72.

ASTM (2021). D698-12, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, 16pp. Disponível em versão digital em <https://www.astm.org/standards/d698>. Acesso em 14/03/2022.

ASTM (2015). D1557-12, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, 14pp. Disponível em versão digital em <https://www.astm.org/d1557-12.html>, acesso em 14/03/2022.

ASTM, (2016a). D4253-16: Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils using a Vibratory Table.

ASTM, (2016b). D4254-16: Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.

BARDEN, L. & SIDES, G.R. (1970). Engineering Behavior and Structure of Compacted Clay, J. of the Soil Mech. and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, 96(SM 4): 1171-1200.

BISHOP, A.W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad*, 106(39): 859-863.

CAI, H., KUCZEK, T., DUNSTON, P. S., & LI, S. (2017). Correlating intelligent compaction data to in situ soil compaction quality measurements. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(8), 04017038.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1981). Influência das Energias Térmica e Mecânica em Propriedades de Engenharia Seleccionadas de Alguns Solos Lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, UFPB, 184 pp.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2017). Solo como material de Construção. In *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. Ed. G.C. Isaia, 3ª ed. São Paulo, IBRACON. Vol. 1, pp. 538-574.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; BARBOSA, M.C.; MENDONÇA, R.M.G.; FARIAS, W.M. & CARDOSO, F.B.F. (2015). Propriedades químicas, mineralógicas e estruturais de solos naturais e compactados. In *Solos não saturados no contexto geotécnico*, 1ª ed. São Paulo, ABMS, pp. 39-78.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CRISPEL, J.J.; MEUSSENS, C. & NARDONE, A. (1987). La reconstitution des éprouvettes em laboratoire: théorie et pratique opératoire. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LPC N° 145*, Paris, França, 54 pp.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; FARIAS, M.M. & REZENDE, L.R. (2012). Infiltração em pavimentos: problemas e soluções. *Série Geotecnia*, Universidade Brasília, Brasília, v. 4, pp. 605-620.

CAMPAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA JR., G.P.N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. In: *Soils and Rocks*, 44(3). www.soilsandrocks.com

CERNICA, J.N. (1995). *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*. Jonh Willey & Sons, Inc. New York, 454 pp.

COELHO, J. A.; AQUINO, S. C. N. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2016). Análise da influência da qualidade da água na compactação de solos tropicais. Brasília: ABPv, Proc. 45ª RAPv, 19º ENACOR, pp. 1-13.

CTS - ISSMFE - COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF THE ISSMFE. Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. ABMS. Progress Report (1982-1985). São Paulo, SP. 1985.

CRISPIM, F.A. (2010). Influência de Variáveis de Compactação na Estrutura dos Solos: Caracterizações Geotécnica, Química, Mineralógica e Microestrutural. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 145pp.

DA SILVA, Matheus Francisco et al (2021). Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil. *Transportation Geotechnics*, v. 26, p. 100443, 2021.

DAS, B.M. (2006). *Principles of Geotechnical Engineering*. 6. ed. Thomson, Canada, 590pp.

DE LIMA, C. D. A., DA MOTTA, L. M. G., & ARAGÃO, F. T. S. (2019). Effects of compaction moisture content on permanent deformation of soils subjected to repeated triaxial load tests. *Transportation Research Record*, 2673(2), 466-476.

DIAS NETO, S. L. S. (2020). Influência do Método de Reconstituição de Corpos de Prova na Estrutura e nas Propriedades Hidráulicas e Mecânicas de um Solo Tropical Laterítico. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, 153 pp.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). Solos – Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas - ME 162/94. Disponível em forma eletrônica em <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me162-94.pdf>, 7pp.

DNIT - Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes (2013). NORMA DNIT 164/2013-ME Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Disponível em https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_164_2013_me.pdf. 7pp.

DOBRESCU, C. (2020). The Dynamic Response of the Vibrating Compactor Roller, Depending on the Viscoelastic Properties of the Soil. *Applied System Innovation*, 3(2), 25.

FARIAS, W.M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; DA SILVA, G.F.; CAMPOS, I.C.O. & SANTOS NETO, P.M. (2011). Influência da Compactação nos micro e mesoporos nanoestruturados e na área superficial específica de um solo laterítico. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. Pirenópolis: Editora Kelps, 2011. v. 1. p. 169-175.

FERNANDES, M.M. (1994). *Sebenta de Mecânica dos Solos*, v. I, FEUP, Porto, 226pp.

FREITAS, M. C. (2016). Avaliação de técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. 201 pp.

GODOY, H.; BERNUCCI, L.B.; NOGAMI, J.S. (1996). Diretrizes para a Identificação Expedita de Solos Tropicais para o Uso em Obras Viárias. XXX Reunião Anual de Pavimentação. Salvador, BA, v. 2. p. 556-568.

GUIMARÃES, R.C., CAMAPUM DE CARVALHO, J. & FARIAS, M.M. (1997). Tecnologia de pavimentação de baixo custo com uso bases de solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego. X Simp. Int. de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, ABPv, Rio de Janeiro, Brasil, v. II, pp. 469-477.

GUIMARÃES, R.C., FLEURY, S.V., JACINTHO, E.C. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2003). Um breve histórico da utilização de solos residuais jovens compactados em construção de barragens. I Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Brasília, Volume Único, pp. 145-154.

HAN, Z & VANAPALLI, S. K. (2016). Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils. *Engineering Geology*, 211, p. 85-97.

HEAD, K.H. (1992). Manual of soil laboratory testing: soil classification and compaction tests. John Wiley & Sons, New York, 1992, v. 1, 388 pp.

HILF, J.W. (1956). An Investigation of Pore Water Pressure in Compacted Cohesive Soils. Technical Memorandum 624. Departament of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. 109 pp.

HOLTZ, R.D & KOVACS, W.D. (1981). An introduction to Geotechnical Engineering, Washington, 733pp.

HOLTZ, R.D; KOVACS, W.D. & SHEAHAN, T. (2011). An introduction to Geotechnical Engineering, Pearson Education Inc. New Jersey, 863pp.

HOGENTGLER, C.A. (1937). Engineering Properties of Soil. McGraw-Hill Book Company, New York, 434pp.

HOSSAIN, M., MULANDI, J., KEACH, L., HUNT, M., & ROMANOSCHI, S. (2006). Intelligent compaction control. In *Airfield and Highway Pavement: Meeting Today's Challenges with Emerging Technologies* (pp. 304-316).

HU, W., POLACZYK, P., JIA, X., GONG, H., & HUANG, B. (2020). Visualization and quantification of lab vibratory compacting process for aggregate base materials using accelerometer. *Transportation Geotechnics*, 25, 100393.

JACINTHO, E.C. (2010). Estudo de Propriedades e Comportamentos de Misturas Solo-Emulsão Aplicado a Barragens. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 279 pp.

KODIKARA, J., ISLAM, T., & SOUNTHARARAJAH, A. (2018). Review of soil compaction: History and recent developments. *Transportation Geotechnics*, 17, 24-34.

LAMBE, T.W. (1958). The Structure of Compacted Clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers*, v. 84, pp. 1-34.

LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V (1969) *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons. 553 pp.

LIMA, M.R.C. (2018). Estudo de técnicas alternativas para monitoramento ótico de tensões, deformações e temperatura em obras de engenharia. Brasília: Tese de Doutorado G.TD - 145/2018, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 169 p. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>

LYON ASSOCIATES INC. (1971). Une Etude Géotechnique pour Agence pour le Développement International, Les Sols Latéritiques et d'Autres Sols Difficiles d'Afrique. Baltimore, Maryland, U.S.A. Building & Road Research Institute, 323pp.

KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. S. & FARIA, V. C. (2018). Comparativo Entre As Compactações Proctor E Vibratória Na Brita Graduada Tratada Com Cimento. *Anais do 32º Congresso de Pesquisa e ensino em Transporte da ANPET*, Gramado. P. 2088-2097.

MEDEIROS, M. C. (2018). Avaliação de métodos para determinação de índices de vazios máximo e mínimo de materiais granulares. Projeto de conclusão de curso, Curso de Engenharia Civil. UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro. Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger, Gustavo Santos Domingos. 83 pp.

MELO, F.G. & FERREIRA, H.N. (1981). Controle da construção de obras de terra. Seminário 249 do LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 64 pp.

NAGULA, S., MAYANJA, P., & GRABE, J. (2018). Deep vibration compaction of sand using mini vibrator. In *Physical Modelling in Geotechnics* (pp. 1229-1233). CRC Press.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1980). Caracterização e Classificação Gerais de Solos para Pavimentação: Limitações do Método Tradicional, Apresentação de uma Nova Sistemática, XV Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, pp. 1-38.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1981). Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*. Rio de Janeiro, pp. 30-41.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. Villibor, São Paulo, 213 pp.

OLSON, R.E. (1963). Effective Stress Theory of Soil Compaction, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, 89(SM 2): 27-45.

PINTO, C. DE S. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3. ed. Oficina de Textos, São Paulo, 356 pp.

PROCTOR, R.R. (1933). Fundamental Principles of Soil Compaction. Engineering News Record, New York, v. 111, pp. 20-28.

QUINTANS, A.L.L. (2008). Estudo das Propriedades Mineralógicas, Físicas e Mecânicas de um Solo Arenoso Fino Laterítico (Saf) Utilizado na Pavimentação do Complexo Aeroportuário da Grande Natal - RN/NE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 154 pp.

RIBEIRO, A. J. A., CRUZ, C. D. S. L., & DE SOUZA, W. M. (2018). Influência da variação dos parâmetros de compactação de solos da região do Cariri. Ciência E Sustentabilidade, 4(1), 156-177.

RIBEIRO, S.P.T. (2008). Terraplenagem. Metodologia e Técnicas de Compactação. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 121 pp.

RICO, A. & DEL CASTILLO, H. (2006). La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Editorial Limusa, México, v. 1, 460 pp.

RODRIGUES, J.K.G. (1998). Pressiômetros, tensões e deformações em sub-base de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 240 pp.

ROY, S., & RAJESH, S. (2020). The coupled effect of suction and net stress on the air permeability of compacted soils. Géotechnique Letters, 10(1), 50-56.

SANTOS, E. F. (2006). Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Classificações Geotécnicas Aplicadas aos Solos Tropicais. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 145 pp.

SANTOS, L. A., LOPES, S. & SILVA, J. (2019). Difficulties of using the Harvard Miniature Compaction Apparatus as a reference test in the study of soil compaction. Portuguese Air Force, Lisbon, Portugal Proceedings of the XVII ECSMGE-2019. Geotechnical Engineering foundation of the future. ISBN 978-9935-9436-1-3. IGS 1 ECSMGE-2019 - Proceedings. 6 pp.

SARKAR, D., GOUDARZY, M., KÖNIG, D., & WICHTMANN, T. (2020). Influence of particle shape and size on the threshold fines content and the limit index void ratios of sands containing non-plastic fines. *Soils and Foundations*, 60(3), 621-633.

SMITH, G.N. & SMITH, I.G.N. (1998) – *Elements of Soil Mechanics*. 7ª ed, Blackwell Science, UK. 509 pp.

SÓRIA, M.H.A. & FABBRI, G.T.P. (1980). O Ensaio Mini-MCV – Um ensaio de MCV, Moisture Conduction Value, com corpos-de-prova de dimensões reduzidas. XV Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, pp. 1-22.

WILBURN, K; VEMBU, K. & VIPULANANDAN, C. (2007). Index Properties and Strength of Artificial Soil Using the Harvard Miniature Method. Report of Department of Environmental and Civil Engineering, University of Houston, 12 pp.

WILSON, S.D. (1950). Small Soil Compaction Apparatus Duplicates Field Results Closely. *Engineering News Record*, New York, v. 145, 18, pp 34 - 36.

ZICA, E. da S. (2010). Estudo comparativo entre energias de compactação do subleito para subsidiar projetos de pavimentação. Dissertação de mestrado. 168 f. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Geotecnia de Pavimentos. Ouro Preto, março de 2010.