

COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

1. INTRODUÇÃO

Muitas vezes na prática da engenharia geotécnica, o solo de um determinado local não apresenta as condições requeridas pela obra. Ele pode ser pouco resistente, muito compressível ou apresentar características que deixam a desejar do ponto de vista econômico. Uma das possibilidades é tentar melhorar as propriedades de engenharia do solo local.

A compactação é um método de estabilização e melhoria do solo através de processo manual ou mecânico, visando reduzir o volume de vazios do solo. A compactação tem em vista estes dois aspectos: aumentar a intimidade de contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo melhorando as suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade.

A compactação de um solo é a sua densificação por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas até soquetes manuais podem ser empregados. Um solo, quando transportado e depositado para a construção de um aterro, fica num estado relativamente fofo e heterogêneo e, portanto, além de pouco resistente e muito deformável, apresenta comportamento diferente de local para local.

A compactação é empregada em diversas obras de engenharia, como: aterros para diversas utilidades, camadas constitutivas dos pavimentos, construção de barragens de terra, preenchimento com terra do espaço atrás de muros de arrimo e reenchimento das inúmeras valetas que se abrem diariamente nas ruas das cidades. Os tipos de obra e de solo disponíveis vão ditar o processo de compactação a ser empregado, a umidade em que o solo deve se encontrar na ocasião e a densidade a ser atingida.

O início da técnica de compactação é creditada ao engenheiro Ralph Proctor, que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação de aterros, mostrando ser a compactação função de quatro variáveis: a) Peso específico seco; b) Umidade; c) Energia de compactação e d) Tipo de solo. A compactação dos solos tem uma grande importância para as obras geotécnicas, já que através do processo de compactação consegue-se promover no solo um aumento de sua resistência e uma diminuição de sua compressibilidade e permeabilidade.

A tabela abaixo apresenta os vários meios empregados para estabilizar um solo:

MÉTODOS	TIPOS
FÍSICOS	Confinamento (solos com atrito)
	Pré-consolidação (solos finos argilosos)
	Mistura (solo + solo)
	Vibroflotação
QUÍMICOS	Sal
	Cal
	Cimento
	Asfalto
	Etc.
MECÂNICOS	Compactação

2. DIFERENÇAS ENTRE COMPACTAÇÃO E ADENSAMENTO

Pelo processo de compactação, a diminuição dos vazios do solo se dá por expulsão do ar contido nos seus vazios, de forma diferente do processo de adensamento, onde ocorre a expulsão de água dos interstícios do solo. As cargas aplicadas quando compactamos o solo são geralmente de natureza dinâmica e o efeito conseguido é imediato, enquanto que o processo de adensamento é deferido no tempo (pode levar muitos anos para que ocorra por completo, a depender do tipo de solo) e as cargas são normalmente estáticas.

3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Aplicando-se uma certa energia de compactação (um certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou um certo número de golpes de um soquete sobre o solo contido num molde), a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver. Quando se compacta com umidade baixa, o atrito as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução de vazios. Para umidades mais elevadas, a água provoca um certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto.

Na compactação, as quantidades de partículas e de água permanecem constantes; o aumento da massa específica corresponde à eliminação de ar dos vazios. Há, portanto, para a energia aplicada, um certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica máxima, ou uma densidade máxima.

4. ENSAIO NORMAL DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de Proctor foi padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7.182/86). Em última revisão, esta norma apresenta diversas alternativas para a realização do ensaio. Descreveremos inicialmente, nos seus aspectos principais, aquela que corresponde ao ensaio original e que ainda é a mais empregada.

A amostra deve ser previamente seca ao ar e destorroada. Inicia-se o ensaio, acrescentando-se água até que o solo fique com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. Não é tão difícil perceber isto, como poderia parecer à primeira vista. Ao se manusear um solo, percebe-se uma umidade relativa que depende dos limites de liquidez e de plasticidade.

- Uma porção do solo é colocada num cilindro padrão (10cm de diâmetro, altura de 12,73cm, volume de 1.000cm³) e submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5Kg e caindo de 30,5cm, ver Figura 01. Anteriormente, o número de golpes era de 25; a alteração da norma para 26 foi feita para ajustar a energia de compactação ao valor de outras normas internacionais. Levando em conta que as dimensões do cilindro padronizado no Brasil são um pouco diferente das demais. A porção do solo compactado deve ocupar cerca de um terço da altura do cilindro. O processo é repetido mais duas vezes, atingindo-se uma altura um pouco superior à do cilindro, o que é possibilitado por um anel complementar. Acerta-se o volume raspando o excesso.

- Determina-se a massa específica do corpo de prova obtido. Com uma amostra de seu interior, determina-se a umidade. Com estes dois valores, calcula-se a densidade seca. A amostra é destorroada, a umidade aumentada (cerca de 2%), nova compactação é feita, e novo par de valores umidade-densidade seca é obtido. A operação é repetida até que se perceba que a densidade, depois de ter subido, já tenha caído em duas ou três operações sucessivas. Note-se que, quando a densidade úmida se mantém constante em duas tentativas sucessivas, a densidade seca já caiu. Se o ensaio começou, de fato, com umidade 5% abaixo da ótima, e os acréscimos forem de 2% a cada tentativa, com 5 determinações o ensaio estará concluído (geralmente não são necessárias mais do que 6 determinações).

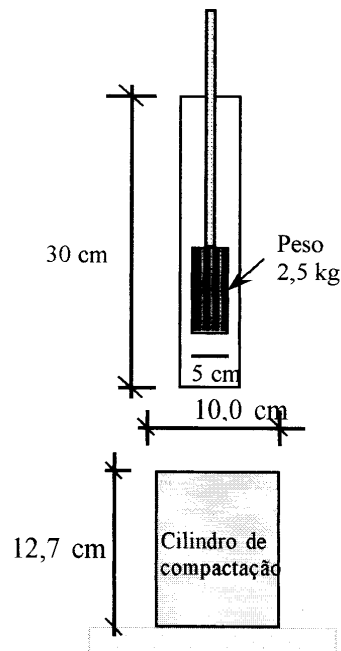


Figura 01: Equipamento de Compactação

5. CURVA DE COMPACTAÇÃO

Com os dados obtidos, desenha-se a curva de compactação, que consiste na representação da densidade seca em função da umidade, como se mostra na Figura 02, geralmente, associa-se uma reta aos pontos ascendentes do ramo seco, outra aos pontos descendentes do ramo úmido e unem-se as duas por uma curva parabólica. Como se justificou anteriormente, a curva define uma densidade seca máxima, à qual corresponde uma umidade ótima.

No próprio gráfico do ensaio pode-se traçar a curva de saturação que corresponde ao lugar geométrico dos valores de umidade e densidade seca, estando o solo saturado. Da mesma forma, pode-se traçar curvas correspondentes a igual grau de saturação. A curva de compactação é definida pela equação:

$$\gamma_d = \frac{S\gamma_s\gamma_w}{S\gamma_w + \gamma_s w}$$

Para solo saturado, $S = 1$;

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s\gamma_w}{\gamma_w + \gamma_s w}$$

Onde:

γ_d – massa específica (ou peso específico) aparente seca do solo;

G_s – densidades dos grãos do solo;

γ_w – massa específica da água (ou peso específico);

e – índice de vazios;

w – teor de umidade.

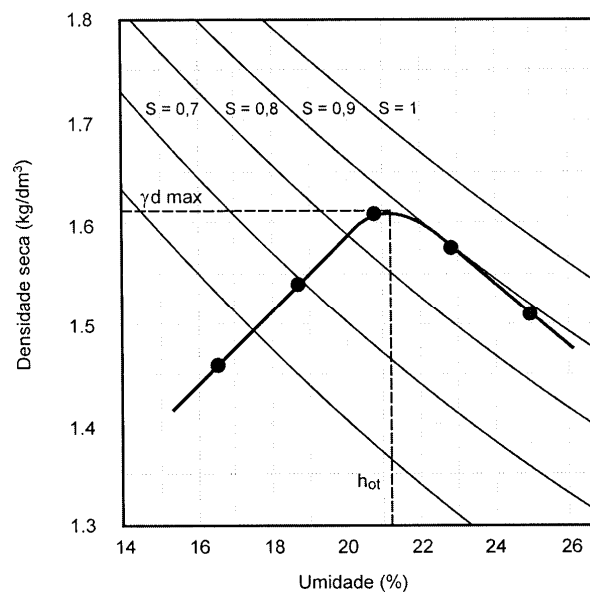


Figura 02: Curva de Compactação

O ramo da curva de compactação anterior ao valor de umidade ótima é denominado de “ramo seco” e o trecho posterior de “ramo úmido” da curva de compactação. No ramo seco, a umidade é baixa, a água contida nos vazios do solo está sob o efeito capilar e exerce uma função aglutinadora entre as partículas. À medida que se adiciona água ao solo ocorre a destruição dos benefícios da capilaridade, tornando-se mais fácil o rearranjo estrutural das partículas. No ramo úmido, a umidade é elevada e a água se encontra livre na estrutura do solo, absorvendo grande parte da energia de compactação.

6. VALORES TÍPICOS

De maneira geral, os solos argilosos apresentam densidades secas baixas e umidade ótimas elevadas. Solos siltesos apresentam também valores baixos de densidade, freqüentemente com curvas de laboratório bem abatidas. As areias com pedregulhos, bem graduados e pouco argilosos, apresentam densidades secas máximas elevadas e umidades ótimas baixas.

7. METODOS ALTERNATIVOS DE COMPACTAÇÃO

A norma Brasileira de ensaio de compactação prevê as seguintes alternativas de ensaio:

- Ensaio sem reuso do material: é utilizada uma amostra virgem para cada ponto da curva;
- Ensaio sem secagem previa do material: dificulta a homogeneização da umidade. Para alguns solos a influência da pré-secagem é considerável;
- Ensaio em solo com pedregulho: quando o solo tiver pedregulho a norma NBR 7.182/86 indica que a compactação seja feita num cilindro maior, com 15,24cm de diâmetro e 11,43 cm de altura, volume de 2.085 cm³. Neste caso o solo é compactado em cinco camadas, aplicando-se 12 golpes por camada, com um soquete mais pesado e com maior altura de queda do que o anterior (massa de 4,536 kg e altura de queda de 47,5 cm).

8. ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

A densidade seca máxima e a umidade ótima determinada no ensaio descrito como Ensaio Normal de Compactação ou Ensaio Proctor Normal não são índices físicos do solo. Estes valores dependem da energia aplicada na compactação. Chama-se

energia de compactação ou esforço de compactação ao trabalho executado, referido a unidade de volume de solo após compactação. A energia de compactação é dada pela seguinte fórmula:

$$EC = \frac{M.H.Ng.Nc}{V}$$

Sendo:

- M – massa do soquete;
- H – altura de queda do soquete;
- Ng – o número de golpes por camada;
- Nc – número de camadas;
- V – volume de solo compactado.

9. INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

A medida que se aumenta a energia de compactação, há uma redução do teor de umidade ótimo e uma elevação do valor do peso específico seco máximo. O gráfico da figura 03 mostra a influência da energia de compactação no teor de umidade ótimo $w_{ótimo}$ e no peso específico seco máximo $\gamma_{dmáx}$.

Tendo em vista o surgimento de novos equipamentos de campo, de grande porte, com possibilidade de elevar a energia de compactação e capazes de implementar uma maior velocidade na construção de aterros, houve a necessidade de se criar em laboratório ensaios com maiores energias que a do Proctor Normal. As energias de compactação usuais são de 6kgf/cm³ para o Proctor Normal, 12,6 kgf/cm³ para o Proctor Intermediário e 25 kgf/cm³ para o Proctor Modificado.

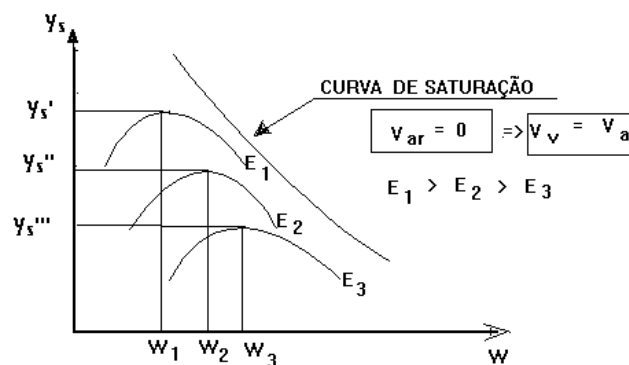


Figura 03: Influência da energia de compactação $\gamma_{dmáx}$ e $w_{ótimo}$

9.1 Ensaio Proctor Normal

O ensaio Proctor Normal utiliza o cilindro de 10 cm de diâmetro, altura de 12,73cm e volume de 1.000cm³ é submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5Kg e caindo de 30,5cm. Corresponde ao efeito de compactação com os equipamentos convencionais de campo.

9.2 Ensaio Modificado

O ensaio Modificado utiliza o cilindro de 15,24 cm de diâmetro, 11,43 cm de altura, 2.085 cm³ de volume, peso do soquete de 4,536 kg e altura de queda de 45,7 cm aplicando-se 55 golpes por camada. É utilizado nas camadas mais importantes do pavimento, para os quais a melhoria das propriedades do solo, justifica o emprego de uma maior energia de compactação.

9.3 Ensaio Intermediário

O ensaio denominado Intermediário difere do modificado só pelo número de golpes por camada que corresponde a 26 golpes por camada, sendo aplicado nas camadas intermediárias do pavimento.

10. CURVA DE RESISTÊNCIA

A compactação do solo deve proporcionar a este, para a energia de compactação adotada, a maior resistência estável possível. O gráfico da figura 04 apresenta a variação da resistência do solo, obtida por meio de um ensaio de penetração realizado com uma agulha Proctor, em função de sua umidade de compactação. Conforme se pode observar, quanto maior a umidade menor a resistência do solo.

Os solos não devem ser compactados abaixo da umidade ótima, por que ela corresponde a umidade que fornece estabilidade ao solo. Não basta que o solo adquira boas propriedades de resistência e deformação, elas devem permanecer durante todo o tempo de vida útil da obra.

Conforme se pode notar do gráfico, caso o solo fosse compactado com umidade inferior a ótima ele iria apresentar resistência superior àquela obtida quando da compactação no teor de umidade ótimo, contudo este solo poderia vir a saturar em campo (em virtude do período de fortes chuvas) vindo alcançar uma umidade correspondente a curva de saturação do solo, para o qual o solo apresenta valor de resistência praticamente nulo. No caso do solo ser compactado na umidade ótima, o valor de sua resistência cairia um pouco, estando o mesmo ainda a apresentar características de resistência razoáveis.

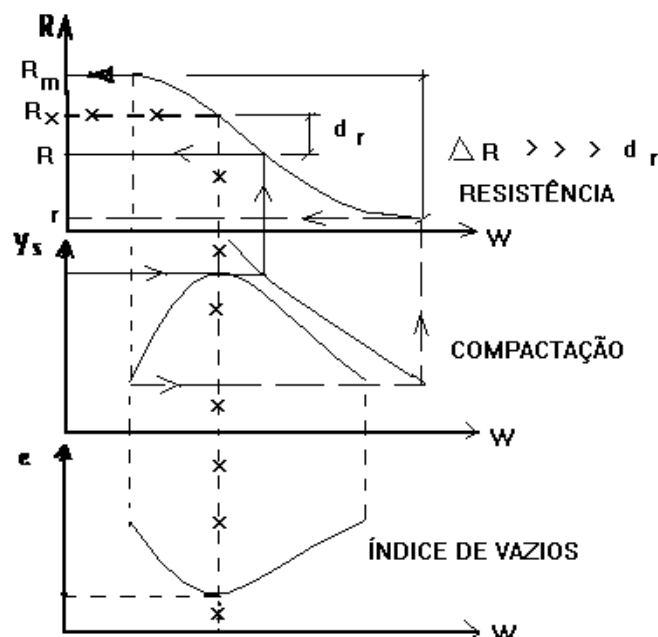


Figura 04: Curva de Resistência, compactação e índice de vazios

11. EQUIPAMENTOS DE CAMPO

Os princípios que estabelecem a compactação dos solos no campo são essencialmente os mesmos discutidos anteriormente para os ensaios em laboratórios. Assim, os valores de peso específico seco máximo obtidos são fundamentalmente função do tipo do solo, da quantidade de água utilizada e da energia específica aplicada pelo equipamento que será utilizado, a qual depende do tipo e peso do equipamento e do número de passadas sucessivas aplicadas.

A energia de compactação no campo pode ser aplicada, como em laboratório, de três maneiras diferentes: por meios de esforços de pressão, impacto, vibração ou por uma combinação destes. Os processos de compactação de campo geralmente

combinam a vibração com a pressão, já que a vibração utilizada isoladamente se mostra pouco eficiente, sendo a pressão necessária para diminuir, com maior eficácia, o volume de vazios interpartículas do solo.

Os equipamentos de compactação são divididos em três categorias: os soquetes mecânicos; os rolos estáticos e os rolos vibratórios.

11.1 Soquetes

São compactadores de impacto utilizados em locais de difícil acesso para os rolos compressores, como em valas, trincheiras, etc. Possuem peso mínimo de 15Kgf, podendo ser manuais ou mecânicos (sapos). A camada compactada deve ter 10 a 15cm para o caso dos solos finos e em torno de 15cm para o caso dos solos grossos.

11.2 Rolos Estáticos

Os rolos estáticos compreendem os rolos pé-de-carneiro, os rolos lisos de roda de aço e os rolos pneumáticos.

- **Pé-de-Carneiro**

Os rolos pé-de-carneiro são constituídos por cilindros metálicos com protuberâncias (patas) solidarizadas, em forma tronco-cônica e com altura de aproximadamente de 20cm. Podem ser alto propulsivos ou arrastados por trator. É indicado na compactação de outros tipos de solo que não a areia e promove um grande entrosamento entre as camadas compactadas.

A camada compactada possui geralmente 15cm, com número de passadas variando entre 4 e 6 para solos finos e de 6 e 8 para solos grossos. A Figura 05 ilustra um rolo compactador do tipo pé-de-carneiro.

As características que afetam a performance dos rolos pé-de-carneiro são a pressão de contato, a área de contato de cada pé, o número de passadas por cobertura e estes elementos dependem do peso total do rolo, o número de pés em contato com o solo e do número de pés por tambor.

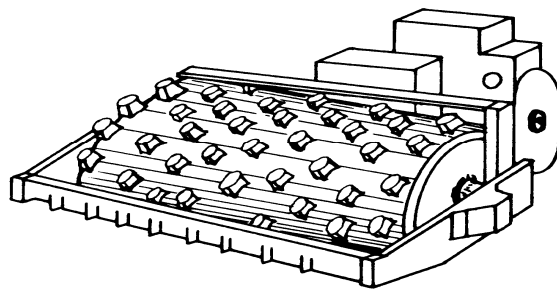


Figura 05: Rolo Pé-de-Carneiro

- **Rolo Liso**

Trata-se de um cilindro liso de aço, podendo ser preenchido por areia úmida ou água, a fim de que seja aumentada a pressão aplicada. São usados em bases de estradas, em capeamentos e são indicados para solos arenosos, pedregulhos e pedra britada, lançados em espessuras inferiores a 15cm.

Este tipo de rolo compacta bem camadas finas de 5 a 15cm com 4 a 5 passadas. Os rolos lisos possuem pesos de 1 a 20t e freqüentemente são utilizados para o acabamento superficial das camadas compactadas. Para a compactação de solos finos utilizam-se rolos com três rodas com pesos em torno de 7t para materiais de baixa plasticidade e 10t, para materiais de alta plasticidade. A Figura 06 ilustra um rolo compactador do tipo liso.

Os rolos lisos possuem certas desvantagens como, pequena área de contato e em solos mole afunda demasiadamente dificultando a tração.

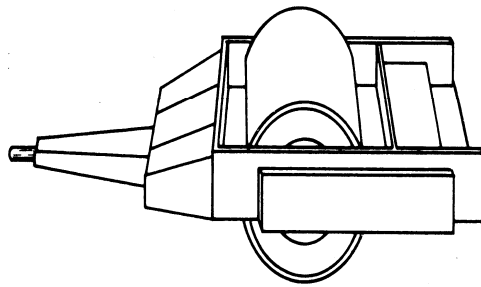


Figura 06: Rolo Liso

- **Rolo Pneumático**

Os rolos pneumáticos são eficientes na compactação de capas asfálticas, bases e subbases de estradas e indicados para solos de granulação fina e arenosa. Os rolos pneumáticos podem ser utilizados em camadas de até 40 cm e possuem área de contato variável, função da pressão nos pneus e do peso do equipamento.

Pode-se usar rolos com cargas elevadas obtendo-se bons resultados. Neste caso, muito cuidado deve ser tomado no sentido de se evitar a ruptura do solo. A Figura 07 ilustra um rolo pneumático

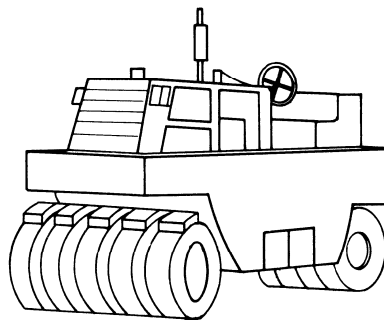


Figura 07: Rolo Pneumático

11.3 Rolos Vibratórios

Nos rolos vibratórios, a frequência da vibração influi de maneira extraordinária no processo de compactação do solo. São utilizados eficientemente na compactação de solos granulares (areias), onde os rolos pneumáticos ou pé-de-carneiro não atuam com eficiência. Este tipo de rolo quando não são usados corretamente produzem super compactação. A espessura máxima da camada é de 15cm. O rolo vibratório pode ser visto na figura 08.

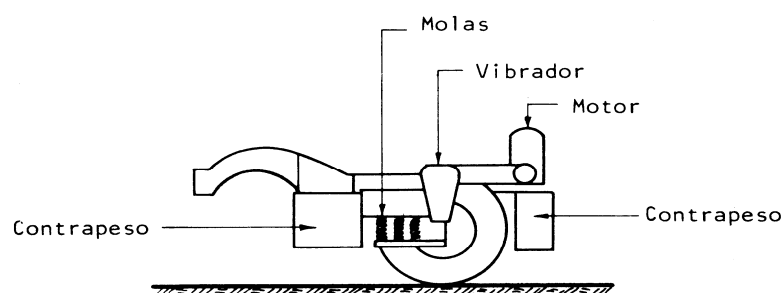


Figura 8: Rolo Vibratório

12. ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO

a) Solos Coesivos

Nos solos coesivos há uma parcela preponderante de partículas finas e muito finas (silte e argila), nas quais as forças de coesão desempenham papel muito importante, sendo indicado a utilização de rolos pé-de-carneiro e os rolos conjugados.

b) Solos Granulares

Nos solos granulares há pouca ou nenhuma coesão entre os grãos existindo, entretanto atrito interno entre os grãos existindo, entretanto atrito interno entre eles, sendo indicado a utilização rolo liso vibratório.

c) Mistura de Solos

Nos solos misturados encontra-se materiais coesivos e granulares em porções diversas, não apresenta característica típica nem de solo coesivo nem de solo granular, sendo indicado a utilização de pé-de-carneiro vibratório

d) Mistura de argila, silte e areia

Rolo pneumático com rodas oscilantes.

e) Qualquer tipo de solo

Rolo pneumático pesado, com pneus de grande diâmetro e largura.

13. CONTROLE DE COMPACTAÇÃO

Para que se possa efetuar um bom controle de compactação do solo em campo, temos que atentar para os seguintes aspectos:

- tipo de solo;
- espessura da camada;
- entrosamento entre as camadas;
- número de passadas;
- tipo de equipamento;
- umidade do solo;
- grau de compactação alcançado.

Assim alguns cuidados devem ser tomados:

- 1) A espessura da camada lançada não deve exceder a 30cm, sendo que a espessura da camada compactada deverá ser menor que 20cm.
- 2) Deve-se realizar a manutenção da umidade do solo o mais próximo possível da umidade ótima.
- 3) Deve-se garantir a homogeneização do solo a ser lançado, tanto no que se refere à umidade quanto ao material.

Na prática, o procedimento usual de controle de compactação é o seguinte:

- Coletam-se amostras de solo da área de empréstimo e efetua-se em laboratório o ensaio de compactação. Obtêm-se a curva de compactação e daí os valores de peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo do solo.
- No campo, à proporção em que o aterro for sendo executado, deve-se verificar, para cada camada compactada, qual o teor de umidade empregado e compará-lo com a umidade ótima determinada em laboratório. Este valor deve atender a seguinte especificação: $w_{\text{campo}} - 2\% < W_{\text{ótima}} < w_{\text{campo}} + 2\%$.
- Determina-se também o peso específico seco do solo no campo, comparando-o com o obtido no laboratório. Define-se então o grau de compactação do solo, dado pela razão entre os pesos específicos secos de campo e de laboratório ($GC = \gamma_{d \text{ campo}} / \gamma_{d \text{ máx}} \times 100$). Deve-se obter sempre valores de grau de compactação superiores a 95%.
- Caso estas especificações não sejam atendidas, o solo terá de ser revolvido, e uma nova compactação deverá ser efetuada.