



**ABNT-Associação
Brasileira de
Normas Técnicas**

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar
CEP 20003 - Caixa Postal 1680
Rio de Janeiro - RJ
Tel.: PABX (021) 210-3122
Telex: (021) 34333 ABNT - BR
Endereço Telegráfico:
NORMATECNICA

Copyright © 1990,
ABNT - Associação Brasileira
de Normas Técnicas
Printed in Brazil/
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

NOV./1991

MB-3443

Solo - Controle de compactação pelo método de Hilf

Método de ensaio

Origem: Projeto 02:004.02-013/91
CB-02 - Comitê Brasileiro de Construção Civil
CE-02:004.02 - Comissão de Estudo de Identificação e Compactação de Solos
MB-3443 - Soil - Compaction control by Hilf method - Method of test

Palavra-chave: Solo

13 páginas

SUMÁRIO

- 1 Objetivo
- 2 Documentos complementares
- 3 Aparelhagem
- 4 Execução do ensaio
- 5 Cálculos
- 6 Resultados
- ANEXO A - Fundamentos teóricos do método de Hilf
- ANEXO B - Construção do ábaco com as curvas de correção $\bar{\Delta}h$
- ANEXO C - Construção do ábaco com as curvas estimadas de umidade ótima
- ANEXO D - Exemplos de aplicação

1 Objetivo

1.1 Esta Norma prescreve o método para controle de compactação de solos pelo método de Hilf⁽¹⁾.

1.2 O método permite determinar o grau de compactação, no ponto de controle, e o valor do desvio de umidade, sem necessidade do conhecimento prévio do teor de umidade do solo compactado naquele ponto.

1.3 Assim, é possível, com reduzida margem de erro e em

intervalo de tempo inferior a 1 h, a tomada de decisão quanto à liberação de uma determinada camada compactada na praça de trabalho.

1.4 Definem-se o grau de compactação e o desvio de umidade, respectivamente, como:

$$GC = \frac{\gamma_{sa}}{\gamma_s^{max}}, \text{ e}$$

$$\Delta h = h_a - h_{ot},$$

Onde:

GC = grau de compactação no ponto ou local de controle

γ_{sa} = massa específica aparente seca do solo compactado, nesse ponto

γ_s^{max} = massa específica aparente seca máxima, obtida no ensaio de compactação, de acordo com a MB-33

$\bar{\Delta}h$ = desvio de umidade

⁽¹⁾ Processo desenvolvido por: Hilf, J. W. (1956). "An Investigation of Pore-Water Pressure In Compacted Cohesive Soils", Technical Memorandum 654, U.S. Bureau of Reclamation; e introduzido no País por Oliveira, H. G. (1959). "O Controle de Compactação de Obras de Terra pelo Método de Hilf". Boletim da Associação Brasileira de Mecânicas dos Solos (ABMS), São Paulo.

h_a = teor de umidade do solo compactado no ponto de controle

h_{ot} = umidade ótima, obtida no ensaio de compactação.

1.5 Esta Norma é aplicada quando o controle de compactação é referido à energia normal de compactação.

1.6 No Anexo A, apresentam-se os fundamentos teóricos do método.

2 Documentos complementares

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

MB-33 - Solo - Ensaio de compactação - Método de ensaio

MB-238 - Solo - Determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia - Método de ensaio

MB-1059 - Solo - Determinação da massa específica aparente "in situ", com emprego de cilindro de cravação - Método de ensaio

3 Aparelhagem

3.1 A aparelhagem básica necessária para a execução do ensaio é aquela relacionada nas MB-33, MB-238 e MB-1059, sendo dispensável a estufa.

3.2 São necessários ainda:

- recipientes adequados para transporte e armazenagem temporária das amostras, sem perda de umidade, como latas de alumínio dotadas de tampas herméticas e sacos plásticos;
- dispositivo que provoque a evaporação gradual e controlada da água presente no solo, tais como ventilador, jato de ar quente, fogareiro com anteparo ou colchão de areia e outros.

4 Execução do ensaio

4.1 No campo

4.1.1 No local onde vai ser efetuado o controle de compactação, escavar até cerca de 5 cm abaixo do solo solto e determinar a massa específica aparente úmida "in situ", γ_{ua} , de acordo com a MB-1059 ou MB-238, cuidando que a amostragem se restrinja à camada de interesse.

4.1.2 Em seguida ou concomitantemente, coletar 10 kg a 12 kg (em massa seca) de amostra, com uso de pá e picareta, observando a precaução anteriormente mencionada e evitando amostrar material superficial ou que tenha sido exposto às intempéries.

4.1.3 A amostra deve ser imediatamente colocada em recipiente que evite perda de umidade. É preferível o uso de lata de alumínio dotada de tampa que a feche hermeticamente. Caso o transporte até o laboratório possa ser efetuado em poucos minutos, admite-se o emprego de saco plástico resistente, sem rasgos ou furos, que deve ser fechado com arame ou cordão, logo após a colocação da

amostra. Em todo caso, no interior do recipiente não deve ocorrer a formação de espaços vazios.

4.1.4 As operações no campo não devem ser realizadas sob chuva.

4.2 Em laboratório

4.2.1 É fundamental que todas as operações envolvidas sejam realizadas rapidamente e de forma a evitar ao máximo a variação de umidade do material, exceto onde houver indicação em contrário. Preferencialmente, o ambiente deve ser climatizado. Ademais, ao se proceder à compactação do material, a amostra deve estar bem homogeneizada.

4.2.2 Destorroar a amostra, passá-la na peneira de 4,8 mm, desprezando o material retido, e homogeneizá-la.

4.2.3 Com o auxílio do repartidor de amostras, ou pelo quarteamento, obter quatro porções, cada uma delas com 2500 g, massa esta determinada e registrada como M_u , com resolução de 1 g. Após a determinação da massa de cada porção, é importante evitar a perda de material, sendo que três delas devem ser imediatamente acondicionadas em sacos plásticos vedados.

4.2.4 Em seguida, a primeira porção (ou amostra) deve ser compactada com o teor de umidade natural da forma descrita na MB-33, valendo-se do cilindro e soquete pequenos, os quais devem igualmente ser usados na compactação das demais amostras.

4.2.5 Determinar a massa específica aparente úmida, γ_u , o parâmetro z (que é nulo no caso da primeira amostra) e a massa específica aparente úmida convertida, γ_{uc} (que é igual a γ_u no caso da primeira amostra), como indicado em 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente.

4.2.6 A segunda amostra deve ser compactada, procedendo-se como descrito na MB-33, ressaltando-se que a quantidade de água adicionada, M_a , deve ser de 50 g (ou 50 mL). Proceder como descrito em 4.2.5.

4.2.7 Se γ_{uc} relativo à segunda amostra for maior que o correspondente à primeira, com a terceira amostra, proceder como descrito em 4.2.6, ressaltando-se que a quantidade de água a ser adicionada, M_a , deve ser de 100 g (ou 100 mL). Caso seja menor, proceder como descrito em 4.2.8 e 4.2.9.

4.2.8 Com auxílio de dispositivo adequado, promover à evaporação da água presente na terceira amostra, com o material espalhado em uma bandeja, e revolvendo-a continuamente. Resfriar o material (se for o caso) e determinar a massa do conjunto bandeja e amostra. Por diferença entre a massa do conjunto determinada antes e depois da redução de umidade, determinar, com resolução de 1 g, a massa de água retirada ou evaporada, M_a , que deve ser da ordem de 50 g.

4.2.9 Homogeneizar e efetuar a compactação do material, como indicado na MB-33. Proceder como descrito em 4.2.5.

4.2.10 Normalmente, três determinações são suficientes e, portanto, a quarta amostra deve ser reservada para dissipar eventuais dúvidas.

4.3 Verificação dos resultados

4.3.1 Determinando-se o teor de umidade das amostras compactadas em laboratório, em estufa a 105°C a 110°C, é possível, no dia seguinte, traçar a correspondente curva de Proctor (γ_s em função de h) e assim efetuar uma verificação dos resultados obtidos pelo método de Hilf.

4.3.2 Uma verificação semelhante pode ser realizada, coletando-se material adicional no ponto de controle, determinando-se o seu teor de umidade e ensaiando-o de acordo com a MB-33. Neste caso, a preparação da amostra e o procedimento de ensaio devem ser selecionados de forma que haja consistência entre seus resultados e aqueles obtidos através do procedimento utilizado no método de Hilf, que é realizado sem secagem prévia até a umidade higroscópica e sem reutilização do material, visto que esses fatores, em determinados solos, exercem influência significativa na curva de compactação resultante.

5 Cálculos

5.1 Determinação da massa específica aparente úmida

Para determinar a massa específica aparente úmida da amostra compactada no cilindro de Proctor, deve-se utilizar a seguinte expressão:

$$\gamma_u = M_h / V$$

Onde:

γ_u = massa específica aparente úmida, em g/cm³

M_h = massa do solo úmido compactado, em g

v = volume útil do molde cilíndrico, em cm³

5.2 Determinação do parâmetro z

Para determinar o parâmetro z, deve-se utilizar a seguinte expressão:

$$z = M_a / M_u$$

Onde:

z = parâmetro positivo ou negativo, respectivamente, conforme se tenha acrescentado ou retirado água da amostra, ou nulo, caso não se tenha acrescentado ou retirado água. É também expressável em %, se multiplicado por 100

M_a = massa de água acrescentada ou retirada da amostra, em g

M_u = massa da amostra úmida, em g

5.3 Determinação da massa específica aparente úmida convertida

Para determinar a massa específica aparente úmida convertida (para a umidade do aterro), γ_{uc} , deve-se utilizar a seguinte expressão:

$$\gamma_{uc} = \frac{\gamma_u}{1 + z}$$

5.4 Determinação dos parâmetros do controle de compactação

Para a determinação dos parâmetros do controle de compactação, três métodos podem ser utilizados (ver 5.4.1 a 5.4.3).

5.4.1 Método A

5.4.1.1 Com os pares de valores γ_{uc} e z , utilizando-se coordenadas cartesianas normais, traçar a curva de compactação de Hilf, marcando-se em abscissas os valores de z e em ordenadas os valores de γ_{uc} . Para tanto, a sistemática mais recomendável consiste em obter previamente, ou com as primeiras determinações, uma família (abrangendo os solos de uma mesma jazida que apresentem pequenas variações de características) de curvas de compactação de Hilf, cada uma com pelo menos cinco pontos. Por semelhança, efetuar o traçado correspondente.

5.4.1.2 Registrar os valores de $\gamma_{uc}^{máx.}$ e z_m , correspondentes ao máximo da curva, e determinar γ_u^m , de acordo com a expressão:

$$\gamma_u^m = \gamma_{uc}^{máx.} (1 + z_m)$$

5.4.1.3 Determinar o grau de compactação, de acordo com a expressão:

$$GC = \frac{\gamma_{ua}}{\gamma_{uc}^{máx.}} \times 100$$

Onde:

GC = grau de compactação, em %

γ_{ua} = massa específica aparente úmida "in situ", determinada conforme 4.1.1, em g/cm³

$\gamma_{uc}^{máx.}$ = massa específica aparente úmida convertida máxima, em g/cm³

5.4.1.4 Determinar o desvio de umidade, Δh (em %), conforme a expressão:

$$\Delta h = - \frac{z_m}{1 + z_m} \left[\frac{1,600 \gamma_u^m}{2,600 \gamma_u^m - 2,537} \right] \times 100$$

5.4.2 Método B

5.4.2.1 Proceder como indicado em 5.4.1.1, empregando-se, porém, um ábaco do tipo exemplificado na Figura 1, contendo as curvas de correção Δ , cuja construção está detalhada no Anexo B.

5.4.2.2 Registrar os valores de $\gamma_{uc}^{máx.}$ e z_m , correspondentes ao máximo da curva. Anotar também o valor da correção, Δ , interpolado entre as curvas tracejadas mais próximas do ponto correspondente ao máximo da curva.

5.4.2.3 Determinar o grau de compactação, GC, como indicado em 5.4.1.3.

5.4.2.4 Determinar o desvio de umidade, Δh (em %), de acordo com a expressão:

$$\Delta h = - (z_m + \Delta)$$

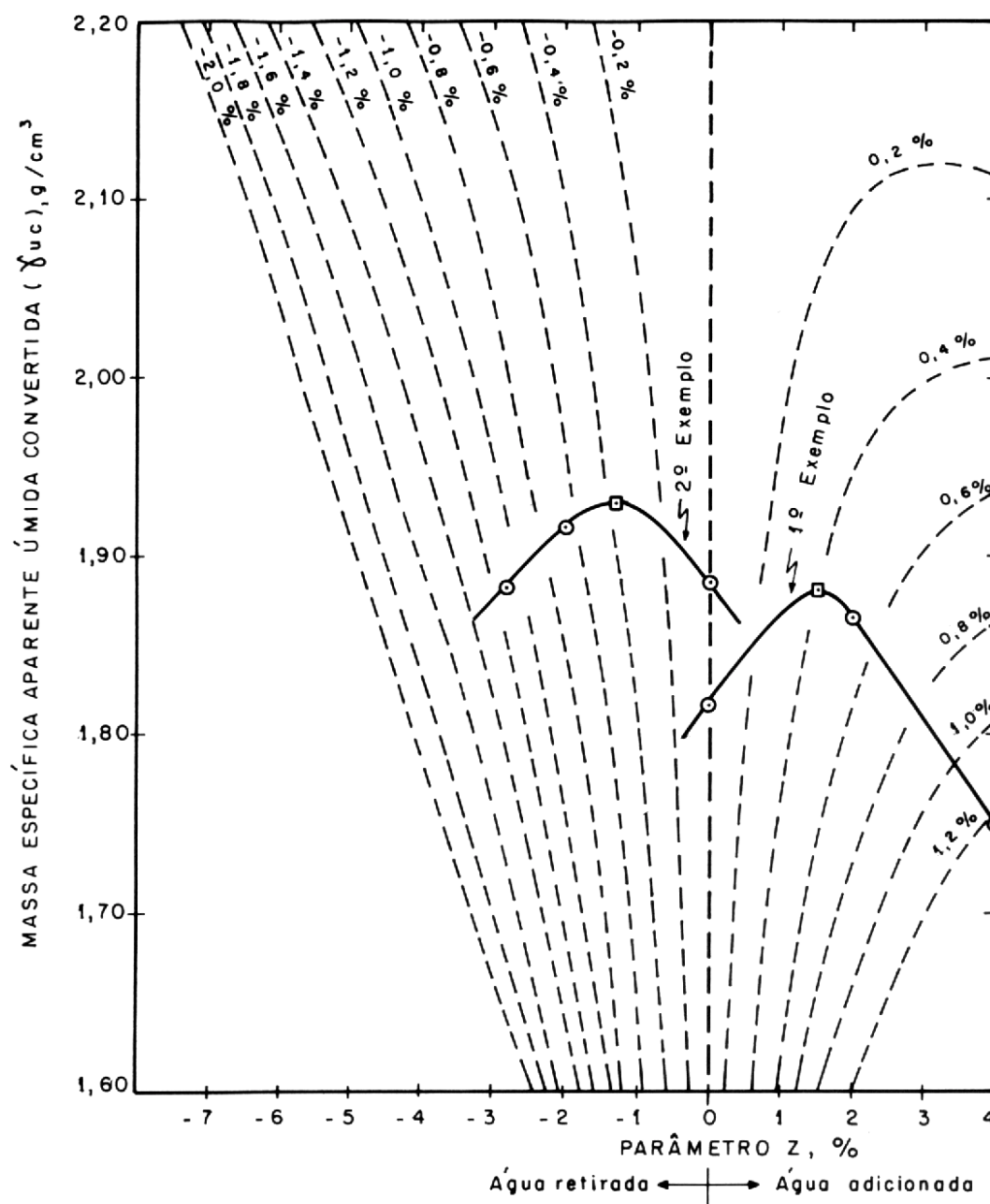


Figura 1 - Ábaco com as curvas de correção Δ (Método B)

5.4.3 Método C

5.4.3.1 Proceder como indicado em 5.4.1.1, empregando-se, porém, um ábaco do tipo exemplificado na Figura 2, contendo as curvas estimadas de h_{ot} , cuja construção está detalhada no Anexo C.⁽²⁾

5.4.3.2 Registrar os valores de $\gamma_{uc}^{máx}$ e z_m , correspondentes ao máximo da curva, e também o valor de h_{ot} , interpolado entre as curvas tracejadas mais próximas do ponto correspondente a este máximo.

5.4.3.3 Determinar o grau de compactação, GC, como indicado em 5.4.1.3.

5.4.3.4 Determinar o desvio de umidade, Δh (em %), de acordo com a expressão:

$$\Delta h = - \frac{z_m}{1 + z_m} (1 + h_{ot}) \times 100$$

5.5 Exemplos de aplicação dos métodos A, B e C

No Anexo D, apresentam-se dois exemplos de aplicação.

5.6 Utilização de outras correlações entre $\gamma_s^{máx}$ e h_{ot}

5.6.1 Em obras de terra de certo porte, onde as investigações laboratoriais sejam mais intensas, no tocante aos parâmetros de compactação, pode-se valer de uma corre-

⁽²⁾ Esta sistemática foi proposta por Franco Filho, J.M.M. e Komesu, I., "Método de Hilf - Estudo de Aplicabilidade", publicação ELETROSUL-COPEL, 1971.

lação local entre $\gamma_s^{\max.}$ e h_{ot} , eventualmente diferente daquela obtida por Kuczinski.⁽³⁾

5.6.2 Tal procedimento é particularmente recomendável para solos em que a massa específica dos grãos se afasta dos valores usuais.

5.6.3 Neste caso, para a obtenção da aludida correlação,

deve-se levar em consideração o assinalado em 4.3.2, no tocante à seleção do processo de preparação e procedimento de ensaio.

5.6.4 Ademais, ao se utilizar uma correlação distinta daquela obtida por Kuczinski, todas as relações decorrentes, apresentadas nesta Norma, devem sofrer as modificações pertinentes.

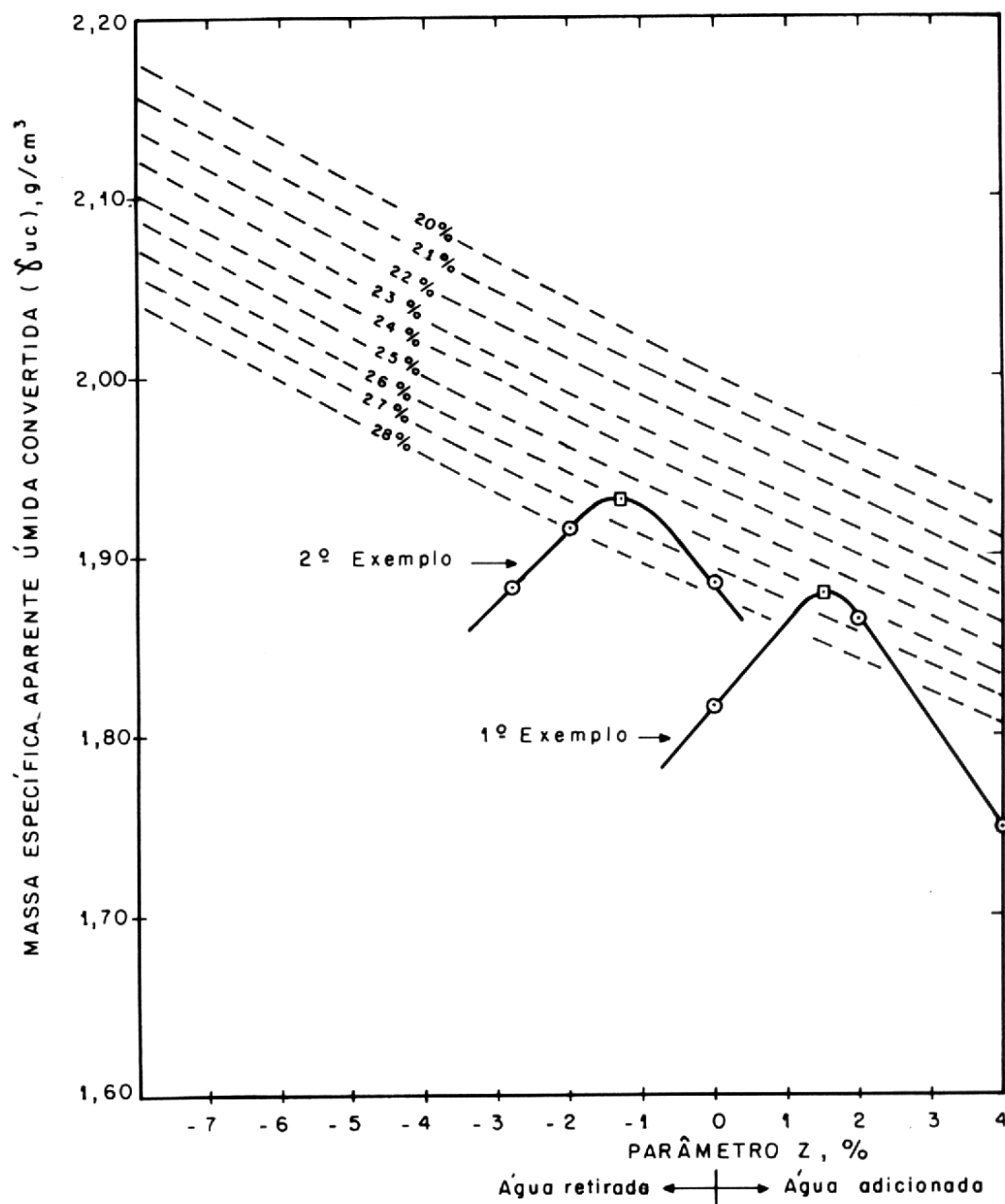


Figura 2 - Ábaco com as curvas estimadas da umidade ótima (Método C)

⁽³⁾ Kuczinski, L., "Estudo Estatístico da Correlação entre as Características de Compactação de Solos Brasileiros", Relatório Final de Bolsa de Estudo na Seção de Solos do IPT, 1950.

6 Resultados

6.1 O grau de compactação e o desvio da umidade devem ser expressos com aproximação de 0,1%. Deve ser assinalado também o método (A, B ou C) utilizado para sua determinação.

6.2 Registrar a data e a identificação do local de amostragem (obras, estaca, afastamento, cota, camada, etc.).

6.3 Caso tenham sido efetuadas verificações a posteriori, indicar ainda os valores desses mesmos parâmetros, assim obtidos, bem como o procedimento adotado. Assinalar também os valores dos parâmetros utilizados nesses cálculos: teor de umidade e massa específica aparente seca do aterro, além da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima obtidas da curva de Proctor.

6.4 Indicar a correlação empregada, se for distinta da correlação devida a Kuczinski.

/ANEXOS



ANEXO A - Fundamentos teóricos do método de Hilf⁽⁴⁾

A-1 Para simplificação, os teores de umidade que compa-
recem nas demonstrações a seguir indicam relações de
massa, não estando expressos em %.

A-2 Admite-se conhecida, γ_{ua} , a massa específica aparen-
te úmida ou natural, correspondente a uma camada de so-
lo compactado no aterro, e sendo, h_a , ou seu teor de umi-
dade, desconhecido no momento da liberação da cama-
da, tem-se:

$$\gamma_{ua} = \gamma_{sa} (1 + h_a), \quad (A.1)$$

Onde:

γ_{sa} = massa específica aparente seca

A-3 Considere-se que, do mesmo local onde se determi-
nou γ_{ua} , foi coletada uma porção de solo que, após homo-
geneizada, é quarteada, sendo que cada quarto está no
mesmo teor de umidade, h_a . A partir do segundo quarto,
são adicionadas ou retiradas quantidades distintas de
água, de modo que a relação entre a massa de água adi-
cionada ou retirada, M_a , e a massa úmida com teor de
umidade h_a , M_u , para cada quarto, seja expressa por:

$$z = M_a / M_u, \quad (A.2)$$

Onde:

z = parâmetro positivo ou negativo, respectivamente,
conforme se tenha acrescentado ou retirado á-
gua do solo. Caso não se tenha acrescentado ou
retirado água do material, z é nulo.

A-4 Considere-se ainda, que, após a homogeneização,
cada quarto é compactado no cilindro de Proctor, na ener-
gia normal, de modo a obter as correspondentes massas
específicas aparentes úmidas do solo compactado, γ_u .

A-5 Para um quarto qualquer, nas condições originais
(sem acréscimo ou retirada de água) e sendo M_s a massa
do solo seco, a massa de água é ($M_s h_a$) e a massa úmida
do solo é [$M_s (1 + h_a)$]. Após a adição ou retirada da fração
 z de água, a massa total de água passa a ser:

$$(M_s h_a + z M_u) = [M_s h_a + z M_s (1 + h_a)] \quad (A.3)$$

Dividindo-se ambos os membros da expressão anterior
por M_s , resulta que o teor de umidade nessas condições,
 h , é dado por:

$$h = h_a + z (1 + h_a) \quad (A.4)$$

Somando-se um a ambos os membros desta expressão,
tem-se:

$$(1 + h) = (1 + h_a) + z (1 + h_a) = (1 + z) (1 + h_a) \quad (A.5)$$

Por outro lado, após a compactação no cilindro de Proc-
tor, a massa específica aparente úmida do solo pode ser
expressa por:

$$\gamma_u = \gamma_s (1 + h) \quad (A.6)$$

Ou:

$$\gamma_u = \gamma_s (1 + z) (1 + h_a) \quad (A.7)$$

Dividindo-se ambos os membros da expressão anterior
por $(1 + z)$, resulta:

$$\gamma_u / (1 + z) = \gamma_s (1 + h_a) = \gamma_{uc} \quad (A.8)$$

O parâmetro γ_{uc} , como definido, é igual a um termo invari-
ante $(1 + h_a)$ multiplicado pela massa específica aparente
seca, ou seja, é diretamente proporcional a γ_s . Por analo-
gia com a expressão (A.6), denomina-se γ_{uc} como sendo a
“massa específica aparente úmida convertida para a umi-
dade do aterro, h_a ”, ou, ainda, de (A.8):

$$\gamma_s = \gamma_u / (1 + h_a) (1 + z) \quad (A.9)$$

$$\gamma_{uc} = \gamma_u / (1 + z) \quad (A.10)$$

A observação destas duas expressões leva a concluir que
 γ_{uc} seria igual a γ_s , desde que h_a fosse nulo. Em outras pa-
lavras, tudo se passa como se γ_{uc} fosse uma pseudomas-
sa específica aparente “seca”, para a qual foi adotado o
teor de umidade do aterro como a origem dos teores de
umidade, que é a definição de z .

Por outro lado, além de γ_{uc} ser diretamente proporcional a
 γ_s , a expressão (A.4) mostra que a relação entre h e z é tam-
bém linear, ficando assim estabelecida uma afinidade geo-
métrica entre a curva de compactação, γ_s em função de h ,
e a curva de Hilf, γ_{uc} em função de z (ver Figura 3). Em
particular, tem-se:

$$\gamma_{uc}^{máx} = \gamma_s^{máx} (1 + h_a) \quad (A.11)$$

A-6 Sejam $\gamma_{uc}^{máx}$ e z_m os parâmetros que definem o ponto
máximo da curva de Hilf, como mostrado na Figura 3. O
grau de compactação, GC, pode ser calculado por:

$$GC = \gamma_{ua} / \gamma_{uc}^{máx} \quad (A.12)$$

De fato, com as expressões (A.1) e (A.11) na anterior,
resulta que:

$$\frac{\gamma_{ua}}{\gamma_{uc}^{máx}} = \frac{\gamma_{sa} (1 + h_a)}{\gamma_s^{máx} (1 + h_a)} = \frac{\gamma_{sa}}{\gamma_s^{máx}} = GC \quad (A.13)$$

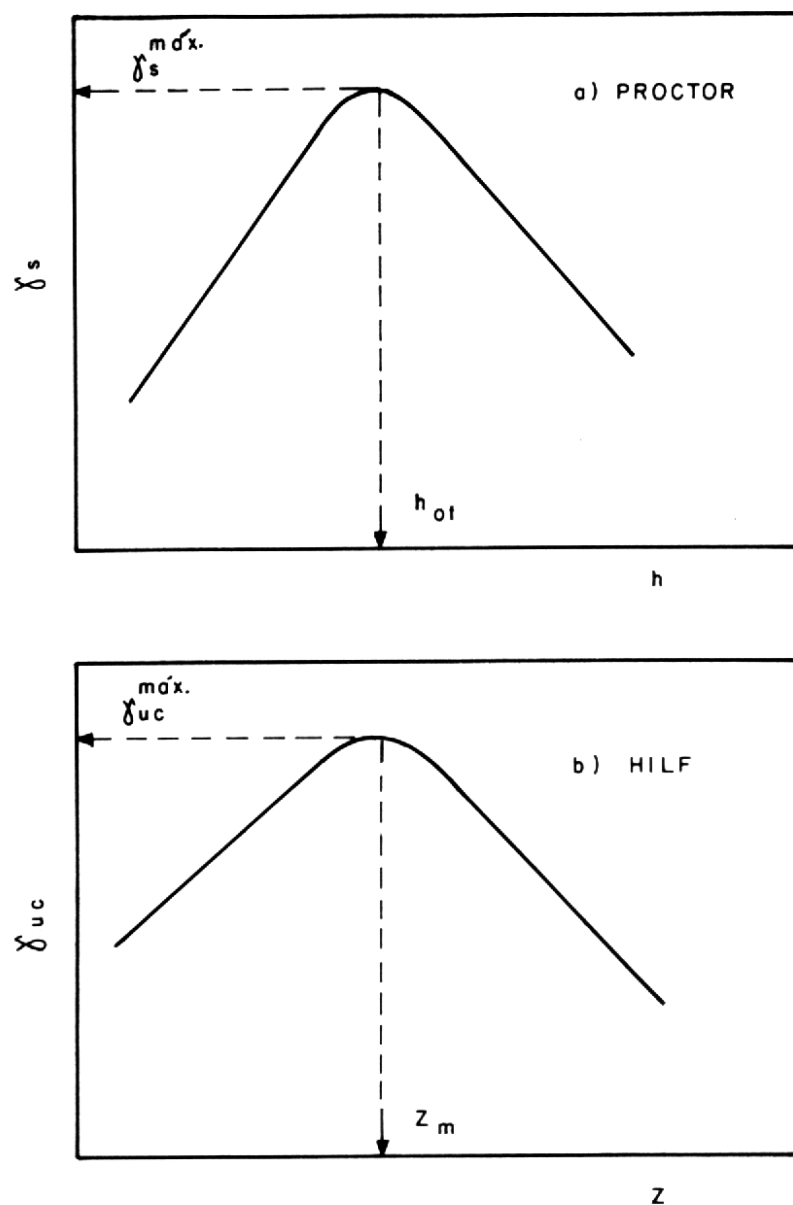
A-7 Face à afinidade existente entre as curvas de com-
pactação e a de Hilf, para $z = z_m$, tem-se $h = h_{ot}$, o que per-
mite reescrever (A.5) da seguinte forma:

$$(1 + h_{ot}) = (1 + h_a) (1 + z_m) \quad (A.14)$$

Ou:

$$1 + h_a = (1 + h_{ot}) / (1 + z_m) \quad (A.15)$$

⁽⁴⁾ Baseado na Apostila (EPUSP-Pós-graduação), “Propriedades dos Solos 1”, de autoria do Prof. Faíçal Massad.



Sendo :

$$\gamma_{uc} = K \gamma_s$$

$$Z = \frac{h}{K} + \left(\frac{1-K}{K} \right)$$

Onde :

$$K = 1 + h_a = \text{CONSTANTE}$$

Figura 3 - Afinidade entre a curva de Proctor e a curva de Hilf

Sendo o desvio de umidade, Δh , definido pela expressão abaixo e tendo em vista a expressão (A.15), resulta:

$$\Delta h = h_a - h_{ot} = (1 + h_a) - (1 + h_{ot}) = \frac{1 + h_{ot}}{1 + z_m} - (1 + h_{ot})$$

Ou:

$$\Delta h = - \frac{z_m}{1 + z_m} (1 + h_{ot}) \quad (\text{A.16})$$

E aqui surge uma dificuldade adicional, pois não se dispõe de h_{ot} , no momento da liberação da camada.

A-8 Como se mostra a seguir, o termo $(1 + h_{ot})$ influi pouco para h_{ot} , variando numa faixa de 10% a 40%. De fato, seja Δh_{ot} um erro no valor de h_{ot} , que gera um erro Δ (Δh), no desvio de umidade. Tem-se que:

$$\Delta h + \Delta (\Delta h) = - \frac{z_m}{1 + z_m} (1 + h_{ot} + \Delta h_{ot})$$

que, combinada com a expressão (A.16), fornece o erro relativo no desvio de umidade:

$$\frac{\Delta (\Delta h)}{\Delta h} = \frac{\Delta h_{ot}}{1 + h_{ot}} \quad (\text{A.17})$$

Ou:

$$\left| \frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h} \right| = \frac{h_{ot}}{1 + h_{ot}} \left| \frac{\Delta h_{ot}}{h_{ot}} \right| \quad (A.18)$$

Com base nesta expressão, foi preparada a Tabela 1, que

mostra um erro relativo da ordem de $\pm 4\%$, quando se estima h_{ot} com uma tolerância de $\pm 5\%$. Em decorrência, por exemplo, para um desvio de umidade $\Delta h = 3\%$, a precisão da sua medida é $\pm 0,04 \times 3 = \pm 0,12\%$, ou seja, $\Delta h = (3 \pm 0,1)\%$. A precisão é bastante satisfatória.

Tabela 1 - Estimativa do erro relativo do desvio de umidade, quando se estima h_{ot} com tolerância de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$

h_{ot} (%)	$\frac{h_{ot}}{1 + h_{ot}}$	$\left \frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h} \right $	
		(%) ^(A)	(%) ^(B)
10	0,091	4,6	9,1
20	0,167	4,2	8,4
30	0,231	3,9	7,7
40	0,286	3,6	7,2

^(A) $|\Delta h_{ot}| = 5\%$ ^(B) $|\Delta h_{ot}| = 10\%$

A-9 Para evitar a necessidade de se estimar h_{ot} , com base apenas na experiência pessoal, recorre-se à correlação estatística entre a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo, conhecida como hipérbole de Kuczinski,⁽⁵⁾ expressa, em g/cm^3 , por:

$$\gamma_s^{máx.} = \frac{2,537}{1 + 2,600 h_{ot}} \quad (A.19)$$

Multiplicando-se ambos os membros desta expressão pela constante $(1 + h_a)$ e com as expressões (A.8), (A.11) e (A.15), resulta:

$$\gamma_{uc}^{máx.} (1 + z_m) = \gamma_u^m = \frac{2,537}{1 + 2,600 h_{ot}} (1 + h_{ot}) \quad (A.20)$$

Logo, como se conhece γ_u^m , pode-se estimar h_{ot} . Note-se que γ_u^m é a massa específica aparente úmida correspondente ao máximo da curva de Proctor (ou Hilf). Por outro lado, isolando-se h_{ot} da expressão (A.20) e substituindo em (A.16), resulta:

$$\Delta h = - \frac{z_m}{1 + z_m} \left[\frac{1,600 \gamma_u^m}{2,600 \gamma_u^m - 2,537} \right] \quad (A.21)$$

que permite estimar o desvio de umidade.

/ANEXO B

⁽⁵⁾ Kuczinski, L., *op. cit.*

ANEXO B - Construção do ábaco com as curvas de correção \mathfrak{D}

B-1 Seja \mathfrak{D} o valor da correção que, somado ao valor z_m , fornece o oposto do desvio de umidade, $-\mathfrak{D}h$, isto é:

$$\mathfrak{D} + z_m = -\mathfrak{D}h = h_{ot} - h_a \quad (B.1)$$

Ou: $\mathfrak{D} = -(\mathfrak{D}h + z_m) \quad (B.2)$

Substituindo-se $\mathfrak{D}h$ pela expressão (A.16), do Anexo A, resulta:

$$\mathfrak{D} = \frac{z_m}{1 + z_m} (1 + h_{ot}) - z_m \quad (B.3)$$

Ou: $h_{ot} = z_m + \frac{\mathfrak{D}(1 + z_m)}{z_m} \quad (B.4)$

B-2 Por outro lado, multiplicando-se ambos os membros da expressão (A.15), do Anexo A, por $\gamma_s^{máx}$, resulta:

$$\gamma_s^{máx} (1 + h_a) = \gamma_s^{máx} \frac{(1 + h_{ot})}{(1 + z_m)}$$

Ou: $\gamma_s^{máx} (1 + h_a) = \frac{\gamma_u^m}{(1 + z_m)} \quad (B.5)$

B-3 Da expressão (A.20), do Anexo A, tem-se ainda que:

$$\gamma_u^m = \frac{2,537}{1 + 2,600 h_{ot}} (1 + h_{ot}) \quad (B.6)$$

B-4 As expressões (B.4), (B.5) e (B.6) possibilitam traçar as curvas de correção \mathfrak{D} . Para tanto, na Tabela 2, exemplificam-se os cálculos necessários para o traçado da curva $\mathfrak{D} = + 0,002$ ou 0,2%. Atribuindo-se valores para z_m , obtêm-se os valores de h_{ot} (coluna 4), que, por sua vez, através da expressão (B.6), fornecem γ_u^m (coluna 5). Com os valores de γ_u^m e $(1 + z_m)$, na expressão (B.5), obtém-se $\gamma_s^{máx} (1 + h_a)$, coluna 6. Os pares de valores $\gamma_s^{máx} (1 + h_a)$, que são iguais a $\gamma_{uc}^{máx}$ e z_m , possibilitam traçar a curva de correção $\mathfrak{D} = + 0,002$ ou 0,2%.

B-5 Variando-se \mathfrak{D} e procedendo-se analogamente, obtém-se a família de curvas tracejadas, apresentadas na Figura 1.

Tabela 2 - Cálculos para o traçado da curva correspondente a $\mathfrak{D} = 0,002$ ou 0,2%

z_m	$1 + z_m$	$\mathfrak{D}(1 + z_m) / z_m$	$h_{ot} = (1) + (3)$	γ_u^m	$\gamma_{uc}^{máx} = (5) / (2)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0,005	1,005	0,4020	0,4070	1,734	1,725
0,010	1,010	0,2020	0,2120	1,982	1,962
0,015	1,015	0,1353	0,1503	2,098	2,067
0,020	1,020	0,1020	0,1220	2,161	2,119
0,025	1,025	0,0820	0,1070	2,197	2,143
0,030	1,030	0,0687	0,0987	2,218	2,153
0,035	1,035	0,0591	0,0941	2,230	2,155
0,040	1,040	0,0520	0,0920	2,236	2,150
0,045	1,045	0,0464	0,0914	2,237	2,141
0,050	1,050	0,0420	0,0920	2,236	2,129
0,055	1,055	0,0384	0,0934	2,232	2,116
0,060	1,060	0,0353	0,0953	2,227	2,101

ANEXO C - Construção do ábaco com as curvas estimadas de umidade ótima

C-1 De (A.20), do Anexo A, tem-se que:

$$\gamma_u^m = \frac{2,537}{1 + 2,600 h_{ot}} (1 + h_{ot}), \text{ e} \quad (\text{C.1})$$

$$\gamma_{uc}^{m\text{áx.}} = \frac{\gamma_u^m}{(1 + z_m)} \quad (\text{C.2})$$

C-2 As expressões (C.1) e (C.2) possibilitam traçar as curvas correspondentes à estimativa de h_{ot} . Para tanto, na Ta-

bela 3, exemplificam-se os cálculos necessários para o traçado da curva $h_{ot} = 20\%$. Com o valor de h_{ot} , na expressão (C.1), obtém-se γ_u^m . A seguir, com este γ_u^m e os valores atribuídos a z_m , obtém-se $\gamma_{uc}^{m\text{áx.}}$, na expressão (C.2). Os pares de valores $\gamma_{uc}^{m\text{áx.}}$ e z_m possibilitam traçar a curva correspondente a $h_{ot} = 20\%$.

C-3 Variando-se h_{ot} , na faixa de interesse, e procedendo-se analogamente, obtém-se a família de curvas tracejadas, apresentadas na Figura 2.

Tabela 3 - Cálculos para o traçado da curva correspondente a $h_{ot} = 20\%$

z_m	$1 + z_m$	γ_u^m	$\gamma_{uc}^{m\text{áx.}} = (3) / (2)$
(1)	(2)	(3)	(4)
-0,07	0,93	2,003	2,154
-0,06	0,94	"	2,131
-0,05	0,95	"	2,108
-0,04	0,96	"	2,086
-0,03	0,97	"	2,065
-0,02	0,98	"	2,044
-0,01	0,99	"	2,023
0	1,00	"	2,003
0,01	1,01	"	1,983
0,02	1,02	"	1,964
0,03	1,03	"	1,945
0,04	1,04	"	1,926

ANEXO D - Exemplos de aplicação

D-1 O primeiro exemplo refere-se a um aterro compactado com teor de umidade abaixo da umidade ótima.

D-1.1 Os ensaios realizados forneceram:

a) no campo, a massa específica aparente úmida do aterro, γ_{ua} :

$$\gamma_{ua} = 1,835 \text{ g/cm}^3$$

b) em laboratório, conforme Tabela 4:

D-1.2 Do traçado da curva γ_{uc} em função de z (Figuras 1 e 2), foram obtidos os valores correspondentes ao máximo da curva:

$$z_m = +1,5\%$$

$$\gamma_{uc}^{máx.} = 1,880 \text{ g/cm}^3$$

além de:

$$\Delta = +0,4\% \text{ (Figura 1)}$$

$$h_{ot} = 26,0\% \text{ (Figura 2)}$$

D-1.3 Da expressão apresentada em 5.4.1.3, resulta o grau de compactação, GC:

$$GC = \frac{1,835}{1,880} = 0,976$$

ou: GC = 97,6%

D-1.4 Pelo método A, obtém-se:

$$\gamma_u^m = 1,880 (1 + 0,015) = 1,908$$

e:

$$\Delta h = - \frac{0,015}{1 + 0,015} \left[\frac{1,600 \times 1,908}{2,600 \times 1,908 - 2,537} \right] = - 0,0186$$

ou: $\Delta h = - 1,9\%$

D-1.5 Pelo método B, obtém-se:

$$\Delta h = - (1,5 + 0,4) = - 1,9$$

logo: $\Delta h = - 1,9\%$

D-1.6 Pelo método C, resulta:

$$\Delta h = - \frac{0,015}{1 + 0,015} (1 + 0,26) = - 0,0186$$

ou: $h = - 1,9\%$

D-1.7 Nota-se que, em termos práticos, os três métodos utilizados conduzem ao mesmo valor do desvio de umidade.

D-2 O segundo exemplo refere-se a um aterro compactado com teor de umidade acima da umidade ótima.

D-2.1 Os ensaios realizados forneceram:

a) no campo, a massa específica aparente úmida do aterro, γ_{ua} :

$$\gamma_{ua} = 1,950 \text{ g/cm}^3$$

b) em laboratório, conforme Tabela 5:

Tabela 4 - Ensaios realizados em laboratório

Ponto	Massa específica aparente úmida, γ_u (g/cm ³)	Parâmetro z (%)	Massa específica aparente úmida convertida, γ_{uc} (g/cm ³)
1	1,815	0	1,815
2	1,902	+2	1,865
3	1,820	+4	1,750

Tabela 5 - Ensaios realizados em laboratório

Ponto	Massa específica aparente úmida, γ_u (g/cm ³)	Parâmetro z (%)	Massa específica aparente úmida convertida, γ_{uc} (g/cm ³)
1	1,885	0	1,885
2	1,876	-2	1,914
3	1,828	-2,8	1,881

D-2.2 Do traçado da curva γ_{uc} em função de z (Figura 1 e 2), foram obtidos os valores correspondentes ao máximo da curva:

$$z_m = -1,3\%$$

$$\gamma_{uc}^{máx.} = 1,930 \text{ g/cm}^3$$

Além de:

$$\Delta = -0,4\% \text{ (Figura 1)}$$

$$h_{ot} = 26,1\% \text{ (Figura 2)}$$

D-2.3 Da expressão apresentada em 5.4.1.3, resulta o grau de compactação, GC:

$$GC = \frac{1,950}{1,930} = 1,01$$

ou:

$$GC = 101,0\%$$

D-2.4 Pelo método A, obtém-se:

$$\gamma_u^m = 1,930 (1 - 0,013) = 1,905$$

e:

$$\Delta h = - \frac{(-0,013)}{1 - 0,013} \left[\frac{1,600 \times 1,905}{2,600 \times 1,905 - 2,537} \right] = 0,0166$$

ou:

$$\Delta h = +1,7\%$$

D-2.5 Pelo método B, obtém-se:

$$\Delta h = - (-1,3 - 0,4) = +1,7$$

logo:

$$\Delta h = +1,7\%$$

D-2.6 Pelo método C, resulta:

$$\Delta h = - \frac{(-0,013)}{1 - 0,013} (1 + 0,261) = 0,0166$$

ou:

$$\Delta h = +1,7\%$$

D-2.7 Novamente se comprova que, em termos práticos, os três métodos utilizados conduzem ao mesmo valor do desvio de umidade.

