

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
ESCOLA DE PERNAMBUCO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Geotécnica Rodoviária
VOLUME 1

ANTÃO MELO

RECIFE
1977

ANTÃO MELO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
ESCOLA DE PERNAMBUCO

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Geotécnica Rodoviária

VOLUME 1

ANTÃO MELO

RECIFE
1977

Introdução

O estudo do solo desempenha um importante papel na engenharia rodoviária. Nesta, é imprescindível conhecer o comportamento do solo como material de construção. Como tal, o solo é utilizado na construção de aterros, na execução da superestrutura das rodovias, como fundação de obras de arte e de aterros, etc. É indispensável estudar e prever o comportamento dos solos constituintes dos cortes, a fim de ser definido o talude que manterá o maciço em equilíbrio.

A falta do conhecimento das características do solo empregado na construção e a ausência de estudo das condições de funcionamento de cada obra conduzem, na grande maioria dos casos, a insucessos.

Não se pode pensar em construir uma estrada sem que sejam conhecidos os solos que a irão constituir. Se isto acontecer, os defeitos fatalmente ocorrerão. Daí, a importância do conhecimento do solo: de sua origem, de sua formação,

de suas características e de seu comportamento nas mais diversas condições.

Nos capítulos seguintes serão abordados, de forma resumida, os diversos aspectos de emprego do solo na técnica rodoviária.

MAIA MELO
BIBLIOTECA

1. A Geotécnica Rodoviária

1.1 - Geotécnica

A GEOTÉCNICA é a ciência que estuda o solo sob todos os aspectos que podem interessar à Engenharia Civil. A geotécnica abrange um campo mais amplo do que o da mecânica dos solos pois engloba o estudo das características físicas e químicas dos solos.

A GEOTÉCNICA RODOVIÁRIA é o ramo da geotécnica que estuda o solo como parte integrante da estrada. Estuda, deste modo, o solo como constituinte dos aterros, dos cortes, das diversas camadas do pavimento, etc.

1.2 - O solo: origem

O solo é um aglomerado natural de partículas minerais, podendo facilmente ser desagregado.

Quanto à origem, os solos se dividem em dois grandes grupos:

- solos orgânicos
- solos inorgânicos

Os solos orgânicos são provenientes da transformação de materiais vegetais e animais, sendo caracterizados pela cor escura e elevado teor em carbono. A turfa é um exemplo desse tipo de solo.

Os solos inorgânicos são provenientes da decomposição de rochas. Eles podem ser agrupados em:

- solos residuais
- solos transportados ou sedimentares.

Os solos residuais são os que se localizam diretamente acima do material de origem. Subdividem-se, de acordo com a natureza da rocha, em:

- de rochas ígnias
- de rochas metamórficas
- de rochas sedimentares

Os solos transportados ou sedimentares, são os que sofreram, após sua formação, a ação de agentes transportadores. Classificam-se em:

- coluviais (transporte: gravidade)
- aluviais (transporte: água)
- glaciais (transporte: geleiras)
- eólicos (transporte: vento)

1.3 - Os elementos constituintes do solo

O solo é constituído por um conjunto de partículas sólidas que se interpõem, deixando entre si vazios, total ou parcialmente preenchidos por água. É, deste modo, o solo, um sistema tri-fásico cujos componentes são: partículas sólidas, água e ar.

As partículas que constituem a fase sólida, são formadas de grãos de forma, dimensão e natureza dependentes da rocha de origem. De acordo com suas dimensões, são classificados em:

- pedregulho
- areia
- silte
- argila

Quanto à forma elas se classificam em: lamelares e arredondadas.

A água constitui a fase líquida e pode ser classificada em:

- água livre ou intersticial
- água capilar
- água adesiva ou de adsorção

A água livre é a água em que circula entre os grãos do solo e tem seu movimento regido pelas leis da Hidráulica.

A água capilar é a que obedece à ação das forças capilares.

A água adesiva é a que envolve o grão por uma película. Esse envolvimento do grão pela água é devido ao fenômeno de atração molecular.

A figura 1 indica as diversas formas de água no solo, a saber: 1) água livre; 2) água capilar; 3) água adesiva.

O ar constitui, finalmente, a fase gaseosa do sistema.

1.4 - Relações volumétricas e ponderais entre as frações constituintes do solo

Representando-se esquematicamente um elemento de solo como na figura 2, em que se fra-

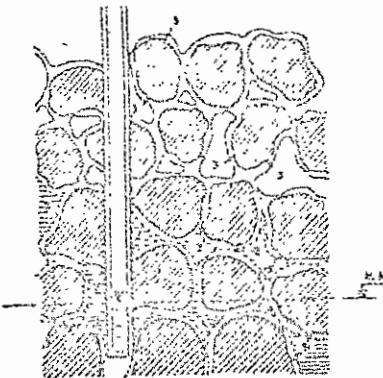


Fig. 1

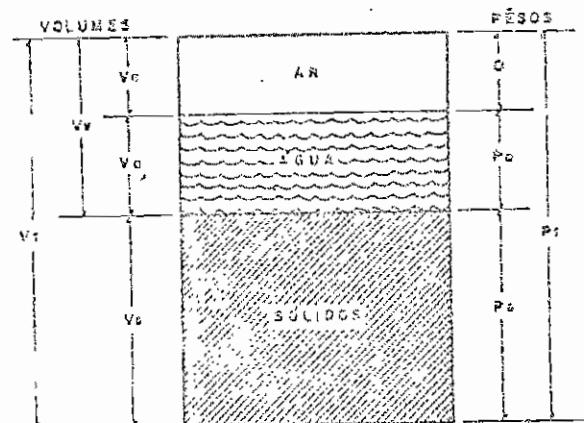


Fig. 2

partes constituintes, sólidos, água e ar, se encontram separadas para efeito de estudo, resultam de imediato as seguintes relações:

$$\begin{aligned} V_t &= V_v + V_s = V_{ar} + V_w + V_s \\ P_t &= P_s + P_a \end{aligned} \quad (1)$$

1.4.1 - Unidade (h)

É a relação entre o peso P_a de água contida em determinado volume de solo e o peso da parte sólida existente neste mesmo volume. A unidade é expressa em percentagem.

$$h = \frac{P_a}{P_s} \times 100 \quad (3)$$

O conceito de umidade acima definido, pressupõe ser considerado como peso de água de uma amostra, todo o peso perdido por esta, quando aquecida em estufa de 105 a 110°C. A umidade é determinada em laboratório por vários processos. Em todos estes, a determinação se baseia no seguinte:

- 1º determinação do peso P_h da amostra de solo;
- 2º secagem da amostra até constância de peso, com a consequente eliminação da água contida;
- 3º determinação do peso P_s da amostra seca;

4.9 cálculo da umidade:

$$h = \frac{P_a}{P_s} 100 = \frac{P_h - P_s}{P_s} 100 \quad (4)$$

Entre os processos mais usuais, citam-se os seguintes:

19 método por secagem em estufa a 105 - 110°C;

29 método por secagem em banho de areia;

... - 39 método por secagem em álcool etílico;

49 método por reação da água com carbureto de cálcio.

1.4.2 - Densidade Relativa das Partículas Sólidas, (6).

É a relação entre o peso da parte sólida e o peso de igual volume de água a 4°C. A Densidade Relativa é determinada pelo picômetro e varia para a maioria dos solos entre 2,65 e 2,85. Para solos com elevado teor em matéria orgânica, a densidade relativa atinge valores de 1,50; pode, no entanto, aumentar até 4,50 para solos com elevado teor em óxido de ferro.

1.4.3 - Peso Específico das Partículas (γ_g)

É o peso da unidade de volume da parte sólida.

$$\gamma_g = \frac{P_s}{V_s}$$

(5)

$$\text{com: } \delta = \frac{\gamma_g}{\gamma_a}$$

onde: γ_a = peso específico da água a 4°C

$$\gamma_g = \delta \gamma_a$$

(6)

1.4.4 Peso específico aparente do solo úmido ($h \neq 0$)

É a relação entre o peso total P_T e o volume total V_T de uma amostra de solo.

$$D_h = \frac{P_T}{V_T}$$

(7)

O peso específico aparente úmido é comumente denominado densidade aparente do solo úmido. O volume V_T considerado, inclui todos os vazios, preenchidos ou não pela água.

1.4.5 - Peso específico aparente do solo seco ($h = 0$)

É a relação entre o peso das partículas

sólidas P_s e o volume total de uma amostra de solo.

$$\boxed{D_s = \frac{P_s}{V_T}}$$

(8)

O peso específico aparente seco é comumente denominado densidade seca.

1.4.5 - Relação entre D_s e D_h

$$\text{Tem-se } D_s = \frac{P_s}{V_T} = \frac{\frac{P_s}{P_T}}{\frac{V_T}{P_T}} = \frac{P_s}{P_T}$$

$$\text{De (2): } P_T = P_s + P_a$$

$$\text{De (7): } D_h = \frac{P_T}{V_T}$$

$$\text{Então: } D_s = \frac{\frac{P_s}{P_s + P_a}}{\frac{V_T}{P_T}} = \frac{\frac{P_s}{P_s + P_a}}{\frac{1}{D_h}} = \frac{P_s}{P_s + P_a} \cdot D_h$$

$$\text{ou: } \frac{1}{D_s} = \frac{1}{D_h} \times \frac{P_s + P_a}{P_s} = \frac{1}{D_h} \left(1 + \frac{P_a}{P_s}\right)$$

$$\text{De (3): } h\% = \frac{P_a}{P_s} \times 100$$

$$\text{Então: } \frac{1}{D_h} = \frac{1}{D_h} \left(1 + \frac{h\%}{100}\right) = \frac{1}{D_h} \left(\frac{100+h\%}{100}\right)$$

ou, finalmente:

$$\boxed{D_s = \frac{100}{100+h\%} \cdot D_h} \quad (9)$$

1.4.7 - Índice de Vazios

É a relação entre o volume total de vazios V_v e o volume V_s da parte sólida da amostra de solo.

$$\boxed{\epsilon = \frac{V_v}{V_s}} \quad (10)$$

1.4.8 - Relação entre ϵ , γ_g e D_s

$$\text{Tem-se: } \epsilon = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_T - V_s}{V_s} = \frac{V_T}{V_s} - 1$$

cu

$$\epsilon = \frac{\frac{V_T}{P_s}}{\frac{V_s}{P_s}} - 1 = \frac{\frac{1}{D_s}}{\frac{1}{D_s}} - 1 = \frac{\gamma_g}{D_s} - 1$$

$$\epsilon = \frac{\frac{V_T}{P_s}}{\frac{V_s}{P_s}} - 1 = \frac{\frac{1}{D_s}}{\frac{1}{D_s}} - 1 = \frac{\gamma_g}{D_s} - 1$$

$$\epsilon = \frac{\gamma_s}{D_s} - 1 \quad (11)$$

1.4.9 ~ Grau de compacidade de um solo sem coesão.

É definido pela expressão:

$$GC = \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\text{nat}}}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}} \quad (12)$$

onde:

ϵ_{\max} = índice de vazios do solo no estado mais solto possível

ϵ_{nat} = índice de vazios do solo no estado natural

ϵ_{\min} = índice de vazios no estado o mais denso possível

O grau de compacidade é também definido por:

$$GC = \frac{D_{\text{nat}} - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \cdot \frac{D_{\max}}{D_{\text{nat}}} \quad (13)$$

onde: D_{nat} , D_{\min} e D_{\max} , representam o peso específico aparente do solo, respectivamente no estado natural, no estado mais solto e mais denso possível.

De acordo com sua compacidade, as areias se classificam em:

SOLTAS se $1/3 > GC > 0$

MEDIANAMENTE

COMPACTADAS se $2/3 > GC > 1/3$

COMPACTADAS se $1 > GC > 2/3$

1.4.10 Porosidade

É a porcentagem de volume de vazios em relação ao volume total da amostra.

$$\eta \% = \frac{V_v}{V_t} \cdot 100 \quad (14)$$

1.4.11 Relação entre ϵ e η

$$\eta \% = \frac{V_v}{V_t} \cdot 100 = \frac{\frac{V}{V_s}}{\frac{V}{V_s} + \frac{V}{V_v}} \cdot 100 = \frac{\epsilon}{1+\epsilon} \cdot 100$$

$$\eta \% = \frac{\epsilon}{1+\epsilon} \cdot 100 \quad (15)$$

1.4.12 Grau de saturação

É a porcentagem de água contida nos vazios do solo

$$S \% = \frac{V_a}{V_v} \cdot 100 \quad (16)$$

Um solo é dito saturado quando todos os seus vazios se encontram preenchidos por água. Neste caso:

$$V_a = V_v \therefore S = 100\% \quad (17)$$

1.4.13 Relação entre S , ϵ e γ_g

$$\text{Temos: } S\% = \frac{V_a}{V_s} \cdot 100 = \frac{V_a}{\epsilon \cdot V_s} \cdot 100 =$$

$$= \frac{\frac{V_a}{P_s}}{\frac{\epsilon \cdot V_s}{P_s}} \cdot 100$$

Mas: $V_a = P_a$ pois $\gamma_a = 1$

$$\frac{V_a}{P_s} \cdot 100 = h\% \text{ e } \frac{P_s}{V_s} = \gamma_g$$

$$S = \frac{\gamma_g \cdot h}{\epsilon}$$

(18)

Se o solo está saturado tem-se $S = 100\%$

Então:

$$100\% = \frac{\gamma_g \cdot h}{\epsilon}$$

$$100\% \epsilon = \gamma_g \cdot h$$

ou:

$$\epsilon = \frac{\gamma_g \cdot h}{100}$$

(19)

1.4.14 Relação entre a umidade do solo saturado, D_s e γ_g .

Se o solo está saturado, tem-se de (18):

$$\begin{aligned} h &= \frac{\frac{V_a}{P_s}}{\frac{\epsilon \cdot V_s}{P_s}} = \frac{\frac{V_a}{P_s}}{\frac{D_s \cdot V_s}{P_s}} = \frac{V_a}{D_s \cdot V_s} = \\ &= \frac{V_T - V_s}{D_s} = \frac{V_T}{D_s} - \frac{V_s}{D_s} \end{aligned}$$

Considerando (5) e (8), tem-se:

$$h = \frac{1}{D_s} - \frac{1}{\gamma_g}$$

ou

$$h\% = 100 \left(\frac{1}{D_s} - \frac{1}{\gamma_g} \right)$$

(20)

1.5 Compactação

1.5.1 Considerações Gerais

Se se considera um solo em seu estado natural e se aplica uma carga, ocorrerá uma diminuição de volume. Esta redução é devida a duas razões essenciais:

1º: os grãos de solo vão ter uma melhor arrumação;

2º: haverá uma certa eliminação de água.

Como já foi visto, uma amostra de solo apresenta grãos sólidos, água e ar. A figura 3 permite apreciar os diversos elementos relativos a pesos e volumes dos três componentes de um solo, onde:

V_t = volume total

V_s = volume das partículas sólidas

V_a = volume de água

V_v = volume de vazios

Conclui-se da figura 3 que:

$$V_t = V_s + V_v$$

$$V_v = V_a + V_{ar}$$

Do mesmo modo, onde:

P_t = peso total da amostra

P_a = peso da água contida na amostra

P_s = peso das partículas sólidas da amostra

Conclui-se igualmente que:

$$P_t = P_a + P_s$$

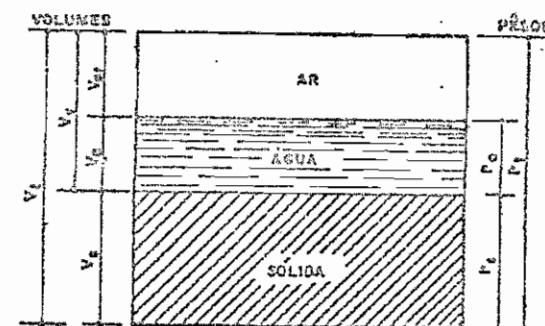


FIG. 3. GRÁFICO DA AMOSTRA DE SOLO

Entende-se por compactação o processo pelo qual se consegue diminuir o índice de vazios do solo, com o consequente aumento de sua densidade. O processo empregado é geralmente mecânico.

A compactação é uma das operações mais importantes para o bom comportamento de uma obra em terra, quer seja uma barragem, um aterro ou um pavimento.

Peltier, expõe o recalque linear r de um aterro pela expressão:

$$r = \frac{5}{9} \cdot \frac{D_f - D_i}{D_f}$$

onde:

D_i = densidade do aterro após a execução do serviço;

D_f = densidade do aterro após o recalque.

Se $D_i/D_f = 90\%$, isto é, se o aterro foi mal compactado e a densidade conseguida quando da execução D_i , foi apenas 90% da densidade que se poderia obter se processos mais energéticos de compactação fossem utilizados, o recalque r será:

$$r = \frac{5}{9}(1 - 0,9) = 5,6\%$$

Deste modo, se o aterro tem quatro metros de altura, o seu recalque após um certo tempo será:

$$5,6\% \times 4m. = 22cm$$

Se este recalque se produzisse de um modo absolutamente uniforme, em toda a extensão do aterro, os resultados não ocasionariam grandes danos. No entanto, o recalque se verifica irregularmente e, apena um recalque diferencial de 10% do recalque total, ou seja $22cm \times 0,10 = 2,2mm$, poderia causar ruptura na placa de concreto de um pavimento rígido ou fissuras em revestimentos de pavimentos flexíveis.

A compactação assume, deste modo, uma importância considerável nos serviços rodoviários, visto os danos que uma insuficiência ou uma compactação irregular, poderão causar à superestrutura da pista.

A compactação, além de possibilitar menores recalques, aumenta a capacidade do solo e proporciona uma menor variação de umidade no interior da obra, dada a menor quantidade de vazios existente.

1.5.2 Curva de Compactação.

Vários fatores intervêm na compactação, a saber:

- teor de água do solo
- energia da compactação
- natureza do solo
- processo de compactação

Vejamos como se processa a compactação em laboratório, como se obtém a curva de compactação e como se interpretam os fenômenos que ocorrem.

Imaginemos o seguinte instrumental necessário para a realização da experiência:

- um cilindro de volume V conhecido, no interior do qual se compactará a amostra;
- um soquete de peso conhecido e que cai sempre de uma mesma altura.

1º Tomemos uma amostra de um determinado solo e adicionemos uma pequena quantidade de água, de modo que a umidade h_1 resultante seja pequena. Procedamos então do seguinte modo:

a. coloquemos no interior do cilindro de volume V uma certa quantidade de solo com umidade h_1 e apliquemos sobre a camada de solo, um certo número de golpes do soquete (12 golpes, por exemplo), de peso e altura de queda conhecidos;

b. repetamos a operação, colocando uma segunda camada de solo com umidade h_1 e aplicando o mesmo número de golpes do mesmo soquete;

c. prossegamos então de modo idêntico, colocando a 3a., 4a.e 5a. camadas e compactando-as, até todo o cilindro ficar preenchido com a amostra de solo compactado.

d. determinemos então:

P'_1 : peso da amostra de solo não compactada;

P_1 : peso da amostra de solo seco compactada

$$P_1 = P'_1 \times \frac{100}{100 + h_1}$$

D_1 = densidade aparente seca da amostra compactada

$$D_1 = \frac{P_1}{V}$$

e. com os valores h_1 e D_1 como coordenadas, marquemos o ponto 1 (figura 4);

2º: Acrescentando água à amostra de modo que ela adquira uma umidade h_2 um pouco maior que h_1 e repetindo as operações já descritas nos sub-itens a, b, c, d, e, obtém-se o ponto 2 através dos valores h_2, D_2 . Observa-se então que $D_2 > D_1$.

3º: Continuando a fazer crescer a umidade e procedendo-se como no item

48: Dado o gráfico seguinte em que:

- o eixo vertical é a densidade aparente;
- o eixo horizontal é a umidade;
- os pontos 1, 2, 3, 4 e 5 representam diferentes fases de compactação;
- os valores crescentes de umidade correspondem a umas fases de compactação mais avançadas e os valores decrescentes a fases de compactação mais tardias.

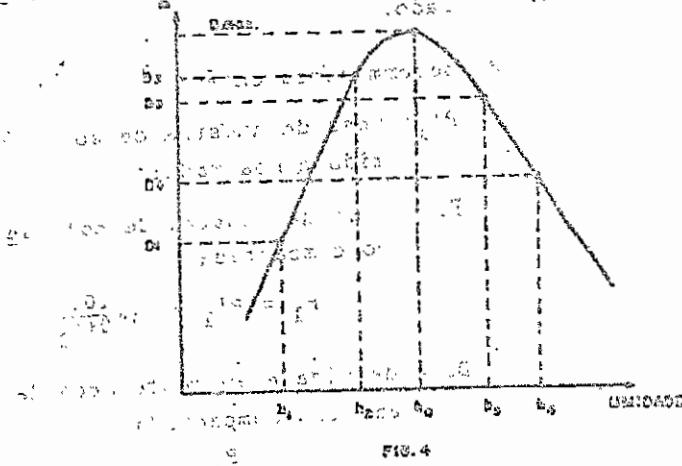
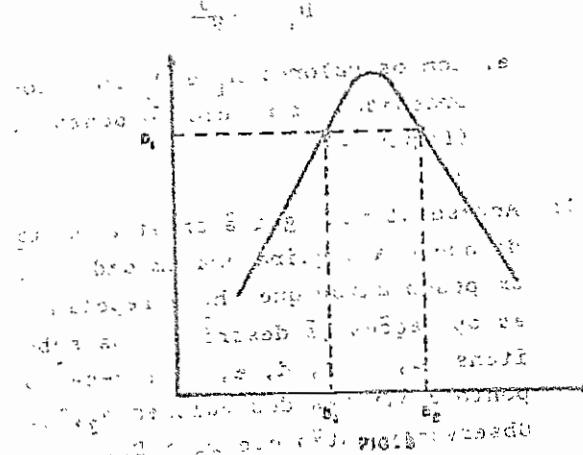


FIG. 4



49: Observe o gráfico de compactação. A curva de compactação é simétrica, com máximos na extremidade esquerda e direita. Os pontos 1, 2, 3, 4 e 5 representam diferentes fases de compactação.

anterior, obtém-se os pontos 3, 4 e 5, a partir dos parâmetros:

- D_3 e D_5 para o ponto 3
- D_4 e D_5 para o ponto 4
- D_5 e D_5 para o ponto 5

Observa-se então o seguinte:

para os valores crescentes de umidade, a densidade aparente seca cresce até um certo ponto, e a partir do qual começa a diminuir.

No exemplo dado, verificam-se que:

$$\begin{aligned} h_1 &< h_2 < h_3 < h_4 < h_5 \\ D_1 &< D_2 > D_3 > D_4 > D_5 \end{aligned}$$

- 49: Ligando-se os pontos 1, 2, 3, 4 e 5, obtém-se a CURVA DE COMPACTAÇÃO. As coordenadas do ponto máximo dessa curva são denominadas de densidade máxima (D_{MAX}) e umidade ótima (h_{opt}). O ramo ascendente da curva é chamado de ramo seco e o descendente, de ramo úmido.

A interpretação física dos fenômenos que ocorrem durante a compactação pode ser descrita do seguinte modo:

- quando a umidade h_1 do solo é muito pequena, o deslocamento das partículas durante a compactação é difícil, face o elevado atrito reinante entre as mesmas;

29

quando a umidade cresce para h_2 , a água passa a atuar como lubrificante, diminuindo o atrito e facilitando a aproximação dos grãos; haverá pois uma menor quantidade de vazios, decorrendo daí uma maior densidade D_2 .

quando a umidade cresce para um valor elevado h_3 , a água passará a absorver parte da energia de compactação e, a água e o ar em conjunto, tenderão a manter as partículas sólidas separadas, aumentando o volume total de vazios e diminuindo a densidade D_3 .

Haverá pois um teor ótimo em água, h_{opt} , para a qual a densidade assume um valor máximo D_{max} . A umidade assim definida é denominada "Umidade Ótima" e a densidade correspondente é chamada "Densidade Máxima".

Isto é válido, como foi de inicio suposto, desde que essas operações sejam realizadas sobre um solo de mesma natureza, que o processo (estático ou dinâmico) de compactação seja também invariável e que uma mesma energia de compactação E_c seja empregada.

Levadas as umidades h_1, h_2, h_3, \dots em abscissas e as densidades D_1, D_2, D_3, \dots em ordenadas, será obtida uma curva como a que indica a figura 4, denominada Curva de Compactação.

Ao se analisar a curva da compactação, observa-se que para um valor D_1 da densidade, correspondente dois valores h_1 e h_2 da umidade (figura 5), sendo uma delas (h_1) do ramo seco e a outra (h_2), do ramo úmido.

Fazendo-se variar a energia de compactação obtém-se uma série de curvas como se observa na figura 6.

Verifica-se que, à medida que a energia de compactação aumenta, a densidade máxima também aumenta, enquanto a umidade ótima diminui. Todas as curvas obtidas têm uma assíntota S na curva de saturação, definida pela equação:

$$h = \frac{1}{D} - \frac{1}{\gamma_g}$$

γ_g = densidade dos grãos

D = densidade aparente

h = umidade

A curva S corta o eixo das densidades para um valor de $D = \gamma_g$. Para $D = 0$, a curva S torna-se assíntota ao eixo das umidades.

As curvas de compactação de um mesmo solo, para diferentes energias de compactação, não se cortam. Se tal ocorresse (figura 7), se poderia ter para uma energia $E_1 > E_2$ e para uma mesma umidade h , densidades $D_1 < D_2$, o que contraria a teoria da compactação.

A compactação influencia algumas das características do solo. Assim, a resistência cres-

30

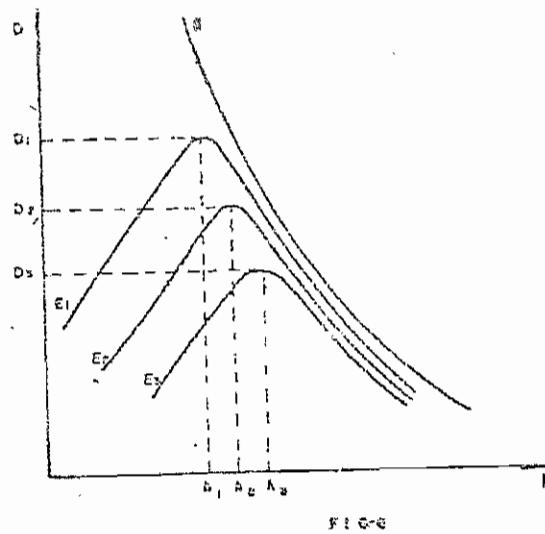


FIG-6

31

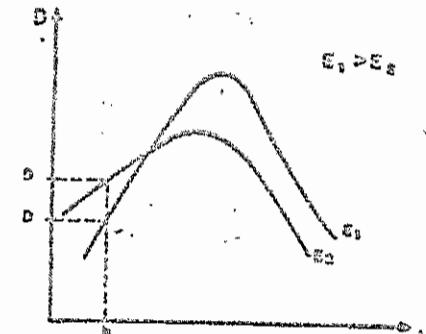


FIG.7

ce, enquanto a permeabilidade e a compressibilidade decrescem.

1.5.4 Variação da resistência com a umidade

A resistência de um solo compactado varia com a umidade utilizada na compactação do mesmo. Utilizando como medida da resistência o ensaio de CBR (California Bearing Ratio), e submetendo-se a este ensaio os corpos de prova compactados com umidades h_1, h_2, \dots, h_5 , (fig. 8), obtém-se resistências R_1, R_2, \dots, R_5 . Observa-se que as resistências decrescem à medida que a umidade cresce.

A curva de resistência apresentará o aspecto indicado na figura 8.

Embora pareça à primeira vista que, do ponto de vista da resistência, seja mais indicado compactar o solo com umidade inferior à ótima, verifica-se ao se considerar a curva de saturação que tal impressão é falsa. Com efeito, admitindo-se o solo nas condições mais desfavoráveis, ou seja, saturado, conclui-se que o máximo de resistência é obtido quando a umidade de compactação é a umidade ótima. Na figura 9, pode-se analisar a evolução da resistência R após a saturação, a saber:

- quando da saturação, a umidade h_1 , cresce para um valor h'_1 ; a resistência unicial R_1 , diminui para um valor R'^1_1 ;

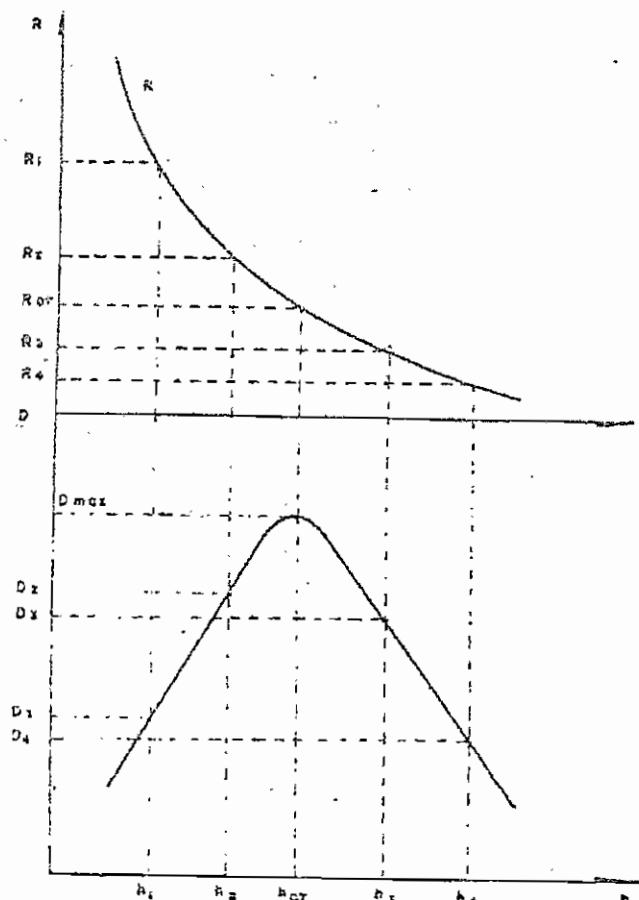


FIG - 8

- o mesmo acontece aos demais pontos com umidades h_2 , h_{ot} , h_3 e h_4 ;
- com os pares (h'_1, R'_{11}) , (h'_2, R'_{12}) , ... (h'_4, R'_{14}) , pode ser traçada a curva Resistência (após saturação) x umidade (inicial);
- observa-se que esta curva apresenta um máximo no ponto (h_{ot}, R'_{ot}) .

No ensaio CBR, utilizado para medir a resistência do solo compactado, a saturação é obtida colocando-se em imersão durante quatro dias o corpo de prova.

Para o cálculo da resistência após saturação, considerou-se na figura 9 que a densidade não sofreria variação com o aumento da umidade. Na realidade verifica-se que quando da saturação, ocorrerá expansão e consequentemente, diminuição da densidade. Os pontos A' , B' e C' (figura 10), ficarão um pouco abaixo das horizontais que passam por A , B e C .

1.5.5 Variação da densidade e da resistência com a energia de compactação

Para uma determinada umidade, a variação de densidade com a energia de compactação é representada pela curva da figura 11. Percebe-se claramente que a densidade cresce com a energia de compactação até certo ponto, a partir do qual o aumento da energia não a faz variar.

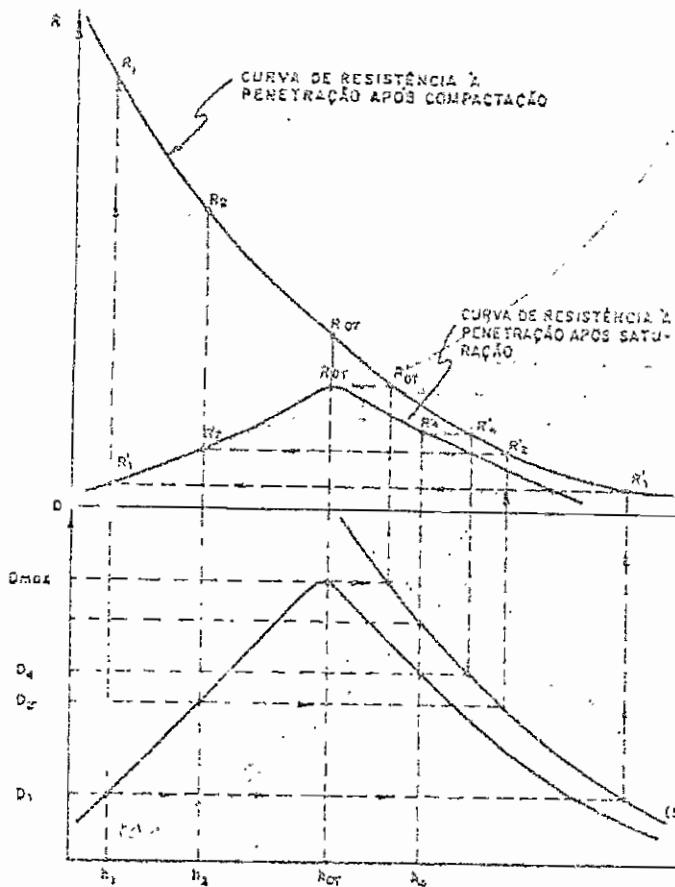


FIG. 9

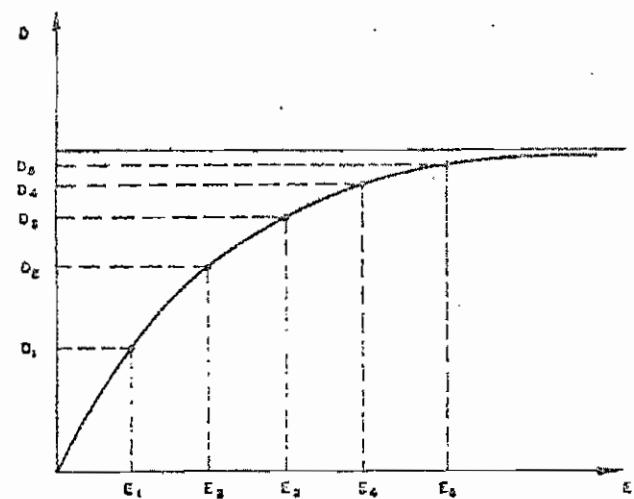
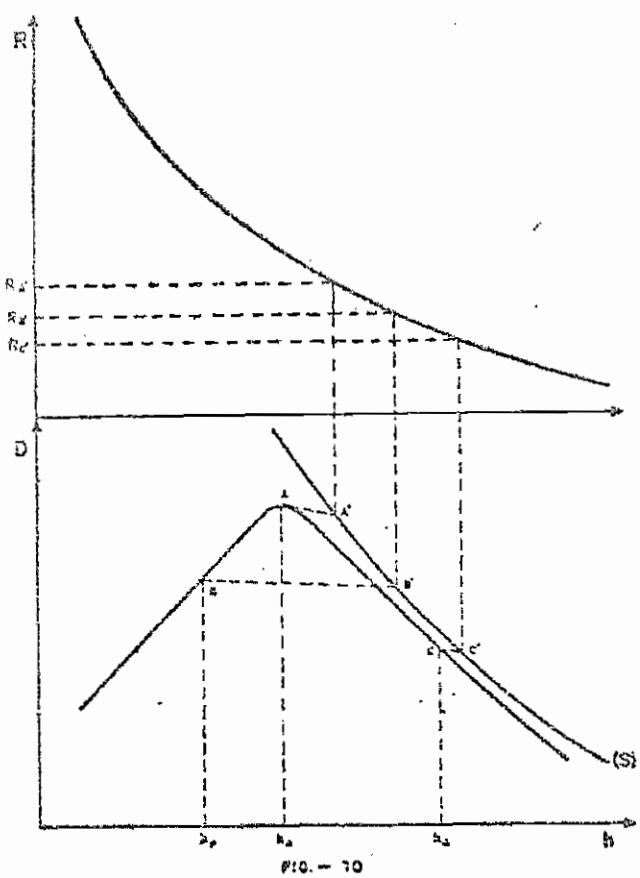


FIG. 11

E te aspecto é de grande interesse prático.

A resistência de um solo também cresce com a energia de compactação.

Em laboratório, são normalizados três ensaios de compactação, a saber:

AASHTO Normal ou Proctor Normal

AASHTO Intermediário

AASHTO Modificado ou Proctor Modificado

Estes são realizados com a seguinte aparelhagem:

- cilindro pequeno ou cilindro Proctor
- cilindro grande ou cilindro CBR
- soquete pequeno ou soquete Proctor
- soquete grande ou soquete CBR
- disco espagador de 2"
- disco espagador de 2 1/2"

Os pesos e dimensões desses aparelhos, são os seguintes:

Cilindro Proctor

Altura: 12,7cm ou 5"
 Diâmetro interno: 10,6cm ou 4"
 Volume: 1.000cm³

Cilindro CBR

Altura: 17,8cm ou 7"

Diâmetro interno: 15,2cm ou 6"

Volume do corpo de prova com disco espagador de 2": 2.315cm³

Volume do corpo de prova com disco espagador de 2 1/2": 2.085cm³

Soquete Proctor

Altura de queda: 30,5cm ou 12"
 Peso: 2.485g ou 5,5 lb

Soquete CBR

Altura de queda: 45,7cm ou 18"
 Peso: 4.536g ou 10 lb

Os ensaios de compactação normal, intermediário e modificado, são realizados de acordo com o Quadro 1.

A energia de compactação por unidade de volume é calculada por:

$$E = \frac{P.h.N.n}{V}$$

P = peso de soquete

h = altura de queda

N = número de golpes por camada

n = número de camadas

V = volume do corpo de prova

A energia para cada um dos três ensaios é:

| | CILINDRO | SOCUETE | DISCO ESPAÇADOR | Nº DE CAMADAS | Nº DE GOL- PES POR CAMADAS |
|-----------------------------|----------|---------|--------------------|------------------|----------------------------------|
| AASHO NORMAL | PEQUENO | PEQUENO | - | 3 | 25 |
| | PEQUENO | GRANDE | - | 3 | 9 |
| | GRANDE | GRANDE | 2" | 5 | 15 |
| | GRANDE | GRANDE | 2 1/2" | 15 | 12 |
| AASHO INTERMEDIÁ- RIO | PEQUENO | PEQUENO | - | 3 | 34 |
| | PEQUENO | GRANDE | - | 5 | 12 |
| | GRANDE | GRANDE | 2" | 5 | 29 |
| | GRANDE | GRANDE | 2 1/2" | 5 | 26 |
| AASHO MODIFICADO | PEQUENO | PEQUENO | - | 5 | 68 |
| | PEQUENO | GRANDE | - | 5 | 25 |
| | GRANDE | GRANDE | 2" | 5 | 61 |
| | GRANDE | GRANDE | 2 1/2" | 5 | 56 |

QUADRO-1

AASHO

| | |
|----------------------|--------------------------|
| AASHO Normal: | 59,8kg m/m ³ |
| AASHO Intermediário: | 129,4kg m/m ³ |
| AASHO Modificado: | 277,1kg m/m ³ |

O cilindro grande deve ser empregado quando o solo apresenta grãos de diâmetro superior a 4,8mm.

Submetendo-se ao ensaio de CBR corpos de prova de um mesmo tipo de solo compactados nas umidades ótimas de cada um dos ensaios de compactação acima, obtém-se curvas do tipo indicado na figura 12.

Conhecida a curva CBR x Densidade, pode-se determinar através da densidade, o CBR correspondente.

1.5.6 Compactação de solos com fração graúda

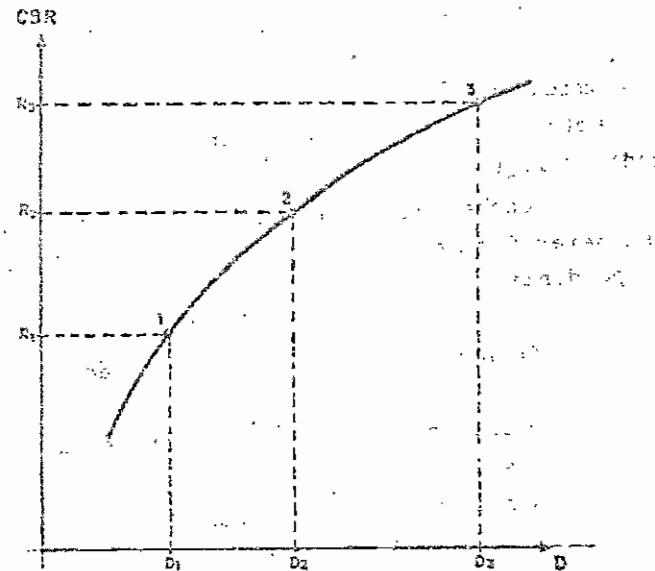
O ensaio de compactação apresenta certos aspectos particulares.

A presença de elementos graúdos no solo, constitui um desses casos.

É evidente que se forem desprezados os elementos graúdos o resultado do ensaio não será representativo para o solo primitivo.

No caso de solos de diâmetro máximo inferior a 4,8mm, o ensaio pode ser realizado no cilindro pequeno.

Elementos de diâmetro superior a 4,8mm, exigem a utilização do cilindro grande. Neste caso, o diâmetro máximo admissível no interior do cilindro é o de 3/4". Se o solo apresenta grãos de maior diâmetro, várias alternativas podem ser empregadas, tais como:



1a. eliminar os grãos de diâmetro superior a $3/4"$, substituindo-os por igual peso de grãos compreendidos entre $3/4"$ e $4,8\text{mm}$;

2a. eliminar os grãos de diâmetro superior a $3/4"$.

A primeira alternativa é a mais empregada.

Um outro processo, consiste em realizar o ensaio sobre a fração do solo de diâmetro inferior a $4,8\text{mm}$, corrigindo-se a densidade obtida em função da porcentagem de elementos de diâmetro superior a $4,8\text{ mm}$. Admite-se para tanto que a modificação de densidade é proporcional à porcentagem em peso dos grãos.

Sendo:

V = volume total do solo

P = peso total do solo

D = densidade aparente final do solo

m = porcentagem de elementos superiores a $4,8\text{mm}$

d_s = densidade aparente da fração de diâmetro inferior a $4,8\text{mm}$.

δ = densidade real dos grãos de diâmetro superior a $4,8\text{mm}$.

Temos que:

$$V = V_{\text{finos}} + V_{\text{grãudos}}$$

$$V = \frac{P}{D_s} = \frac{(1 - \frac{m}{100}) \cdot P}{d_s} + \frac{\frac{m}{100} \cdot P}{\delta} \quad \text{ou}$$

$$D_s = \frac{d_s \cdot \delta}{d_s \cdot \frac{m}{100} + \delta(1 - \frac{m}{100})}$$

Este processo, no entanto, não dá resultados satisfatórios na prática.

1.5.7 Controle de Compactação

O controle da compactação tem por finalidade verificar se a densidade, apresentada pelo solo após um determinado número de passagens do equipamento compactador é a que se pretendia alcançar.

São utilizados vários métodos, conhecidos por:

- método da areia
- método do óleo
- método do cilindro biselado
- método do densitômetro de membrana.

O procedimento mais usual é o da areia que consiste basicamente em:

- a. realizar um furo na camada compactada com diâmetro de 12,2cm, na espessura da camada.

- b. pesar o material P_h retirado do furo;
- c. determinar a umidade h do solo retirado do furo;
- d. calcular o peso seco P_s do solo

$$P_s = P_h \cdot \frac{100}{100+h}$$

- e. determinar o volume V do furo;
- f. calcular o peso específico aparente do solo seco

$$D_s = \frac{P_s}{V}$$

- g. calcular o grau de compactação GC

$$(GC) = \frac{D_s}{D_{\text{MAX}}} \cdot 100$$

O cálculo do volume V do furo, utilizando o método da areia, consistem em:

- 1º: preparar a areia a ser usada para rando-a entre as peneiras de nº 20 e 30;
- 2º: determinar em laboratório o peso de areia no funil (P_f);
- 3º: determinar em laboratório a densidade aparente da areia (d_a);
- 4º: encher o frasco com areia, colocar o funil e pesar (P_1);

- 59: colocar o funil na abertura do furo e abrir o registro (fig. 13b) até que a areia encha o furo e o funil; em seguida, fechar o registro e pesar o frasco com a areia restante (P_r);

O peso de areia contida no furo é dado por

$$P_i = P_r - P_f$$

O volume do furo V é dado por

$$V = \frac{P_i - P_r - P_f}{d_a}$$

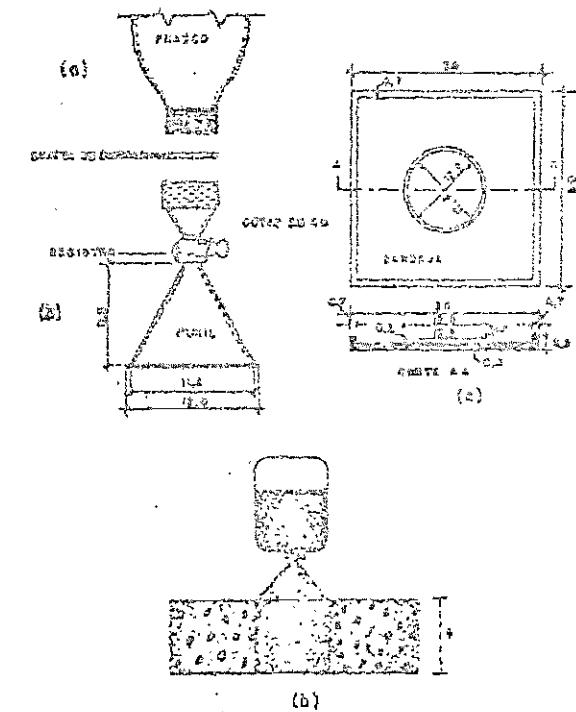


FIG. 13

Apêndice
Problemas

1. Na execução do aterro as estacas 10 e 30 serão utilizados o solo proveniente do corte cujo centro de gravidade está situado na estaca 55. O solo deste apresenta as seguintes características médias:

Densidade máxima: 1.950 kg/m^3

Umidade ótima: 10,5%

Umidade natural: 2,3%

O aterro a ser construído apresenta as seguintes características:

Largura da plataforma: 14m

Talude: 2:1 (H:V)

Altura média: 5m

Sabe-se ainda que as especificações de construção exigem ser obtida no aterro, após a compactação, uma densidade igual ou superior à densidade máxima obtida em laboratório.

Pedem-se calcular:

- a) a quantidade de água a ser aplicada na compactação, considerando-se uma perda de 2% na quantidade de água, devida à evaporação e vazamentos;
- b) calcular o custo do transporte do solo do corte para o aterro, sabendo-se que ele será efetuado pela fórmula:

$$y = 1,80x + 0,30$$

onde:

x = distância em km

y = preço em Cr\$/t

Solução

Item a:

VOLUME DO ATERRAMENTO:

$$400m \times 5m \times \frac{14 + (14 + 10 + 10)}{2} m^3 \\ = 400m \times 5m \times 24m = 48.000m^3$$

PESO DO SOLO SECO UTILIZADO NO ATERRAMENTO:

$$48.000m^3 \times 1.950\text{km/m}^3 = 93.600\text{t.}$$

PESO DA ÁGUA NECESSÁRIA A ADICIONAR DE MODO A LAVAR A UMIDADE DE 2,3 A 10,5%:

$$P_a = \frac{h \cdot P_s}{100} \therefore P_a = \frac{1}{100} \times (10,5 - 2,3) \\ \times 93.600\text{t} = 7.675,2\text{t.}$$

ÁGUA A SER ACRESCIDA DEVIDO À PERDA:

$$7.675,2\text{t} \times 0,02 = 153,5\text{t}$$

TOTAL DA ÁGUA A SER APLICADA:

$$7.675,2 + 153,5 = 7.828,7m^3$$

Item b:

DISTÂNCIA A SER PERCORRIDA DO CENTRO DE GRAVIDADE DO CORTE PARA O ATERRAMENTO:

est. 55 - est. 20 $\therefore d = 700\text{m}$

ou $x = 0,7\text{km}$

PESO DO SOLO A SER TRANSPORTADO:

SOLO SECO: 93.600t

SOLO COM 2,3% DE UMIDADE:

$$93.600 \times \frac{100 + 2,3}{100} = 93.600 \times 1,023 = \\ = 95.752,8\text{t}$$

CUSTO DE TRANSPORTE POR t:

$$y = 1,60 \times 0,7 + 0,30 = 1,42$$

CUSTO DO TRANSPORTE:

$$95.752,8\text{t} \times \text{Cr\$ } 1,42/\text{t} = \text{Cr\$ } 135.958,97$$

2.

NA EXECUÇÃO DE UMA OBRA DE TERRA SERÁ UTILIZADO UM SOLO COM AS SEGUINTE CARACTERÍSTICAS:

DENSIDADE REAL

dos grãos: $\gamma_g = 2.700\text{kg/m}^3$

DENSIDADE MÁXIMA: $D_{max} = 2.150\text{kg/m}^3$

UMIDADE ÓTIMA: $h = 10,5\%$

QUE PORCENTAGEM DA DENSIDADE MÁXIMA DEVE SER EXIGIDA NA COMPACTAÇÃO DE MODO QUE A PORCENTAGEM DE VAZIOS DO SOLO APÓS COMPACTAÇÃO SEJA NO MÁXIMO IGUAL A 30%?

Solução

A RELAÇÃO ENTRE γ_g , e E D_s É A SEGUINTE:

$$\epsilon = \frac{\gamma_g}{\gamma_s} - 1 \text{ ou } D_s = \frac{\gamma_g}{\gamma_s + 1}$$

Em nosso caso:

$$D_s = \frac{2.700}{0,30+1} = \frac{2.700}{1,30} = 2.076,9 = 2.077$$

Este valor de D_s representa:

$$\frac{2.077 \times 100}{2.160} = 96,6\% \text{ da densidade máxima}$$

Logo, deve ser exigido na execução um valor da densidade igual ou superior a 96,6% da densidade máxima.

3. Na realização da concorrência para execução de um aterro, apresentaram-se 3 firmas que ofereceram os seguintes resultados:

| | |
|-----------|---------------------------|
| Firma A : | Cr\$ 10,20/m ³ |
| Firma B : | Cr\$ 8,25/m ³ |
| Firma C : | Cr\$ 7,15/m ³ |

O critério de julgamento admite como ganhador o concorrente que oferecer o preço mais próximo do orçamento do DER. Pede-se então indicar qual a firma vencedora e qual o preço obtido no orçamento do DER.

São dados:

- a. Volume (após a compactação), do aterro a executar 260.000m³
- b. Posição da jazida e da fonte de água a usar anexo 1
- c. Características do material da jazida anexo 1
- d. Acréscimo de umidade para compensar as perdas por evaporação 3%
- e. Densidade a ser obtida na compactação do aterro 90% da D_{MAX}
- f. Rendimento do equipamento, tendo em vista as chuvas 0,8
- g. Horas de trabalho por mês 200h
- h. Tipo e produção do equipamento para execução de cada fase do serviço Quadro I
- i. Custo horário do equipamento Quadro I
- j. Cronograma para execução Quadro I

OBSERVAÇÕES:

- 1º: Calcular as quantidades de cada tipo de serviço preenchendo o Quadro I;
- 2º: Calcular as produções horárias do equipamento de transporte, preenchendo o Quadro I;
- 3º: Calcular a quantidade a empregar de cada equipamento (em números inteiros), preenchendo o Quadro I;
- 4º: Calcular o custo total e o custo por m^3 compactado, indicando o corrente vencedor.

SOLUÇÃO

1. Volume do aterro após compactação:

$$250.000m^3$$

2. Volume de solo a ser escavado:

$$250.000m^3 \times \frac{0.9 \times 2.000}{1.500} kg/m^3 = 300.000m^3$$

3. Volume de solo a transportar:

$$300.000m^3$$

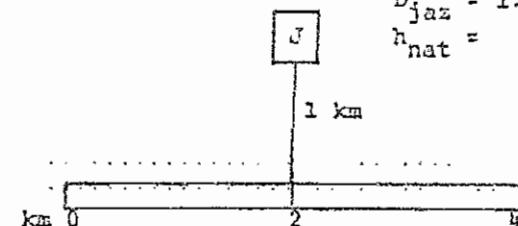
4. DMT para o solo (Anexo 1)

$$DMT = 1 km + \frac{2 \times 1 + 2 \times 1}{4} km = 1 + 1 = 2 km$$

ANEXO 1

1. Posição da Jazida e características do material

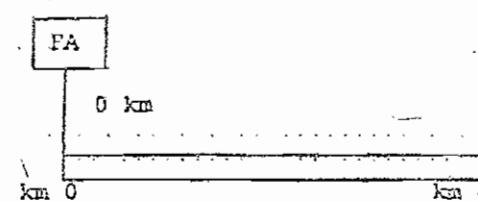
$$\begin{aligned} D_{\max} &= 2.000 \text{kg/m}^3 \\ h_{\text{ot}} &= 15\% \\ D_{\text{jaz}} &= 1.500 \text{kg/m}^3 \\ h_{\text{nat}} &= 5\% \end{aligned}$$



$$DMT = \dots 2 \text{ km}$$

$$\text{CÁLCULO: } DMT = 1 \text{ km} + \frac{2 \times 1 + 2 \times 1}{4} \text{ km} = 2 \text{ km}$$

2. Posição da Fonte de Água



$$DMT = \dots 2 \text{ km}$$

$$\text{CÁLCULO: } DMT = 4 + 2 = 2 \text{ km}$$

| terreno | unid | Quantidade | Cronograma | | | Equipamentos | | | Custo Total Cr\$ |
|---------------------------------|----------------|------------|------------|---|---|---|-------|--------------|--|
| | | | F | M | A | Tipo | Tempo | Custo Cr\$/h | |
| excavação de solo na foz do Rio | m ³ | 300.000 | | | | 1 trator D7-F 1 caminhão de 12m ³ 1 caminhão de 11m ³ | 400h | 400.000 | 120.000,00 |
| transporte de solo | m ³ | 300.000 | | | | caminhão de 11m ³ LX-1113 da Pneus 145 hp | 400h | 15.400 | 554.000,00 |
| Transporte de águas | m ³ | 50.500 | | | | caminhão de 6m ³ LX-1113 da Pneus 6.000 litros | 100h | 10.000 | 50.000,00 |
| compactação | m ³ | 250.000 | | | | rotovadora de rolo vibratório 11ro. | 125h | 150.00 | 625.000,00 |
| | | | | | | | | | 2.042.000,00 |
| | | | | | | | | | CUSTO TOTAL POR m ³ COMPACTADO Cr\$ 6,17/m ³ |

QUADRO 1

5. Quantidade de água a transportar

$$P_Q = 250.000 \text{m}^3 \times 0,9 \times 2.000 \text{kg/m}^3 \times \frac{(15-5+3)}{100}$$

$$= 58.500 \text{m}^3$$

6. DMT para a água (Anexo 1)

$$\text{DMT} = 2 \text{ km}$$

7. Produção do equipamento de transporte de solo

$$P = \frac{200}{8 \times 2 + 4} = \frac{200}{20} = 10 \text{m}^3/\text{h}$$

8. Produção do equipamento de transporte de água

$$P = \frac{200}{8 \times 2 + 4} = \frac{200}{4} = \frac{200 \times 5}{20 \times 4} = 15 \text{m}^3/\text{h}$$

9. Quantidade de equipamento de escavação de solo

Prazo: 4 meses = 4x200h = 800 horas
Rendimento efetivo: 120m³/hx0,9 =
= 96m³/h

Tempo de execução: 300.000m³ ÷ 96
m³/h = 3.125h

Quantidade de equipamento: 3.125h

÷ 800 h = 3,9

Considerar 4 conjuntos

10. Quantidade de equipamento de transporte de solo

Prazo: 4 meses = 4x200h = 800 horas

Rendimento efetivo: $10m^3/h \times 0,8 = 8m^3/h$
 Tempo de execução: $300.000m^3/h \div 8 =$
 $= 37.500$ horas
 Quantidade: $37.500 \div 800 = 46,8$
 Considerar 47 caminhões

11. Quantidade de equipamento de transporte de água

Prazo: 3,5 meses = $3,5 \times 200h = 700$ horas
 Rendimento efetivo: $15m^3/h \times 0,8 = 12m^3/h$
 Tempo de execução: $58.500m^3 \div 12m^3/h =$
 $4.875h$
 Quantidade: $4.875 \div 700h = 6,9$
 Considerar 7 caminhões

12. Quantidade de equipamento de compactação

Prazo: 3,5 meses = $3,5 \times 200h = 700h$
 Rendimento efetivo: $125m^3/h \times 0,8 =$
 $= 100m^3/h$
 Tempo de execução: $250.000m^3 \div 100m^3/h =$
 $= 2.500h$
 Quantidade: $2.500h \div 700h = 3,6$
 Considerar 4 conjuntos

13. Custo de escavação

$800h \times 4 \text{ conj.} \times Cr\$ 300/h = Cr\$ 960.000,00$

14. Custo do transporte de solo

$800h \times 47 \text{ cam.} \times Cr\$ 15,00/h = Cr\$ 564.000,00$

15. Custo do transporte de água

$700h \times 7 \text{ cam.} \times Cr\$ 20,00/h = Cr\$ 98.000,00$

16. Custo da compactação
 $700h \times 4 \text{ conj.} \times Cr\$ 150,00/h = Cr\$$
 $420.000,00$

17. Custo total
 $(960+564+98+420).1.000 = Cr\$$
 $2.042.000,00$

18. Custo por m^3 compactado
 $Cr\$ 2.042.000,00 \div 250.000m^3 = Cr\$$
 $8,17/m^3$

19. Concorrente vencedor
 Foi a firma B

4. Na execução de um aterro deverá ser empregado um solo com as seguintes características:

- a) densidade real dos grãos: $2.700kg/m^3$
- b) densidade máxima: $1.940kg/m^3$
- c) umidade ótima: $10,0\%$
- d) curva resistência à penetração x umidade fig. 1
- e) curva densidade x umidade fig. 1

Pedem-se:

- 19: traçar a curva de saturação na fig. 1
- 20: traçar a curva resistência do solo saturado x umidade
- 39: determinar que variação em torno da umidade ótima deve ser admitida de modo que a resistência do solo

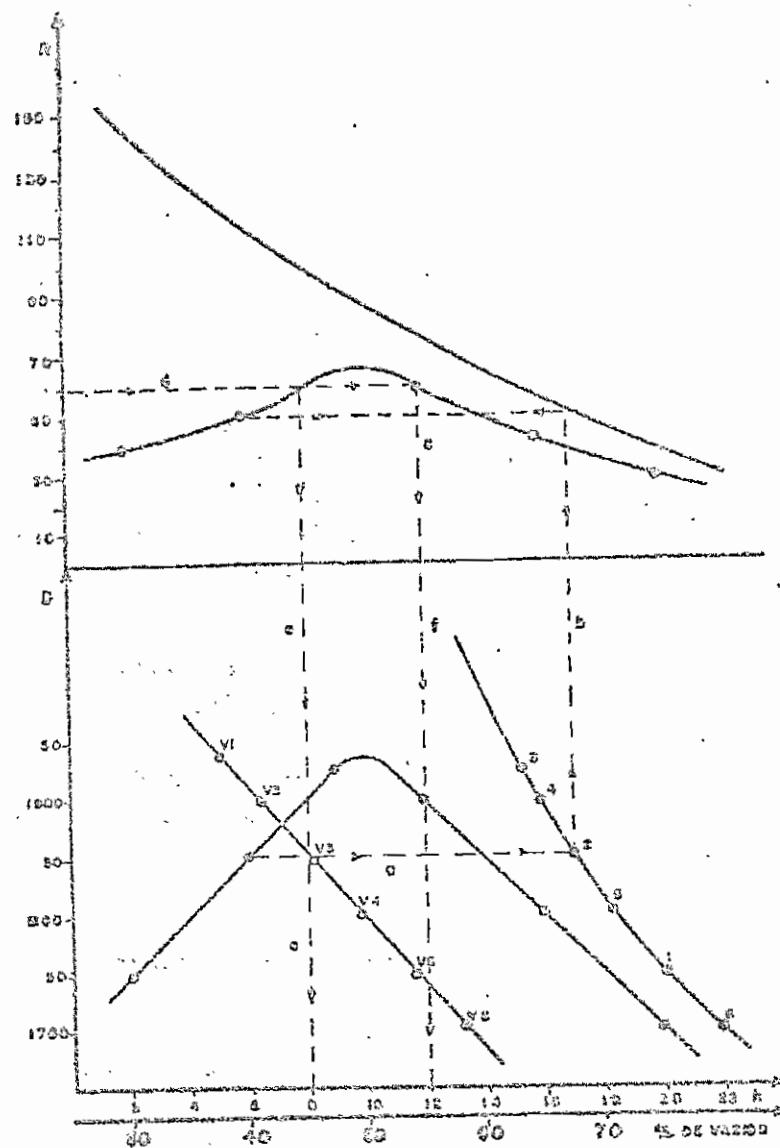


FIG. 1

compactado e saturado seja superior a 80.

- 48: trazer a curva \bar{v} de vazios x densidade

Solução

- 19 indicada na fig. 1. Os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 8 da curva de saturação foram obtidos de:

$$h = 100 \left(\frac{1}{B} - \frac{1}{Y_g} \right)$$

- 28 está indicado na figura 1. Foi obtida por pontos, segundo o esquema $a + b + c$.

- 39 está indicada na figura 1. Foi obtida de acordo com a sequência d e + f.

O intervalo solicitado é $\pm 2\%$, em torno de h_{st} , ou seja, de 8 a 12%.

- 49 a curva de vazios x densidade, foi obtida por pontos (V_1, V_2, \dots, V_6) usando-se

$$\epsilon = \frac{Y_g}{D_s} - 1$$

5. Na execução da base de um pavimento entre as estacas 15 e 135, conhecem-se os seguintes elementos:

largura da base: 12 m

espessura da base: 0,20 m

As características do material a ser empregado são as seguintes:

Densidade máxima : 2.010 kg/m^3
 Umidade ótima: 8,5%
 Umidade natural na jazida: 1,8%
 Densidade "in situ" umida
 do material na jazida: 1.650 kg/m^3
 Espessura média da jazida: 0,80m

Considerando-se que nas operações de escavação, transporte e execução de base ocorrerão as seguintes perdas:

Umidade: 2%
 Volume de solo: 10% em relação ao volume escavado

Pedem-se calcular:

- volume de solo a ser escavado na jazida;
- área da jazida a ser explorada;
- quantidade de água a ser adicionada ao solo durante a compactação considerando-se apenas o volume de solo correspondente ao volume teórico de base.
- custo total dos serviços considerando os seguintes elementos:
 escavação em solo: Cr\$. 2,20/ m^3
 transporte do solo
 da jazida para a pista: $y = 0,80x + 0,12$

onde: $y = \text{Cr\$}/\text{t}$
 $x = \text{km}$

transporte de água da fonte para a pista:

$$y = 0,01x + 0,150$$

onde: $y = \text{Cr\$}/\text{t}$
 $x = \text{km}$
 execução da base: Cr\$ 8,00/ m^3

A jazida está situada na est. 233, à margem da estrada. A fonte de água está situada à margem da estrada, na estação 35.

- Que valor assumiria a densidade aparente seca no ponto em que a curva de saturação de um solo cortasse o eixo das ordenadas (eixo das densidades)?
- São conhecidos os seguintes dados:
 - Trecho a pavimentar: da estação 0 a 500
 - Serviço a executar: base com 20 cm de espessura, 12m de largura na face superior e taludes de 1:1,5;
 - materiais a usar:
 J1: Localização: est. 150 a 0,8 km do eixo;

Volume.16.000m³; Densidade máxima,
2.000kg/m³; h_{ct}: 10,0%; h_{nat}: 2,0%;
Dens. na jazida: 1.540 kg/m³.

52: Localização : est. 500 a 0,5km do eixo; Volume 30.000m³; Dens. Max: 2.100kg/m³; h_{ct}: 8,0%; h_{nat}: 2,0%; Dens. na jazida: 1.600kg/m³.

- Especificações a usar na compactação da base: obter densidade no mínimo igual a 98% da densidade máxima.
- Obs: a fonte de água a ser usada está na estaca 500 a 1 km do eixo.

Pedem-se:

a. Elaborar o orçamento do serviço considerando-se os seguintes itens:

1 - Escavação de material para a base
Preço unitário: Cr\$ 2,10/m³

2 - Transporte de solo
Preço unitário pela fórmula
 $y = \frac{60,54}{200} (3,4x + 5)$

sendo x = distância em km
 $y = \text{preço em Cr\$}/\text{m}^3$

3 - Transporte de água

Preço unitário pela fórmula
 $y = \frac{60,00}{200} (3,4x + 5)$

4 - Execução da base
Preço unitário: Cr\$ 8,70/m³.

b. Considerando-se que os serviços se desenvolvam conforme cronograma a-dante, pede-se dimensionar o equipamento de transporte, admitindo-se que:

1º solo: usar caminhão LK-1113 de 145 HP com 4 m³

2º água: usar caminhão de 6.000 litros

3º produção em m³/h de caminhão de 4 m³

$$P = \frac{200}{K \cdot x + 5} \text{ sendo } K = 3,4$$

4º horas trabalhadas: 200h/mês

5º rendimento médio do serviço tendo em vista as chuvas: 0,8.

6º Cronograma

| Serviço | Mês | | | | | |
|--------------------|-----|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Escavação | | . | | | | |
| Transporte de solo | | | | | | |
| Transporte de água | | | | | | |
| Execução | | | | | | |

Respostas:

a. 1. Escavação:

$$31.550\text{m}^3 \times 2,10 = 65.255,00$$

2. Transp.solo:

$$31.550\text{m}^3 \times 1,95 = 61.522,50$$

3. Transp.água:

$$3.284\text{m}^3 \times 3,91 = 12.840,44$$

4. Execução:

$$24.600\text{m}^3 \times 3,70 = \underline{\underline{91.026,00}}$$

total Cr\$ 231.637,94

DMT - água: 6,2km

solo: 2,3km

- b. 1. Transporte de solo: 5 caminhões
2. Transporte de água: 1 caminhão.

c.

Para a execução de uma base em solo brita, dispõem-se de um produto total de britagem(material A) e do solo da jazi-

da 1 (material B) cujas características são dadas no Anexo 1. A localização dos materiais é dada no gráfico 1. O conjunto de britagem será instalado junto à pedreira.

São dados ainda:

- a) características geométricas da base (Anexo 2)
- b) faixa granulométrica da especificação para base (Anexo 1)
- c) produção do equipamento de transporte (Anexo 2)
- d) cronograma (Anexo 2)

Pedem-se:

- 1º Classificar pelo HRB e calcular o IG dos materiais A e B;
- 2º Calcular a composição da mistura dos materiais A e B;
- 3º Localizar a usina de solos de modo que a distância de transporte da mistura seja mínima;
- 4º Localizar a usina de solos, de modo que as distâncias de transporte de solo, de produto total de britagem e da mistura, seja mínima;

- 5º Calcular, para o caso anterior, o DMT final, levando em conta o transporte de solo (da jazida para a usina), de produto total de britagem (da pedreira para a usina) e da mistura (da usina para a pista);
- 6º Dimensionar o equipamento de transporte, de modo que os transportes sejam realizados conforme o cronograma anexo. Considerar 8 horas de trabalho por dia e 25 dias por mês;
- 7º Elaborar um cronograma de utilização do equipamento;
- 8º Sugerir, caso necessário, alguma alteração no cronograma.

Respostas

- 1º A classificação e o IG, são:
 material A: A.1.a e IG = 0
 material B: A.2.4 e IG = 0
- 2º A composição da mistura, obtida graficamente no Anexo I da 70% de A e 30% de B
- 3º Considerando que os materiais A e B já se encontram na usina, o momento de transporte dos mesmos para a pista é:

$$MT = V \cdot DMT = V_1 \cdot \frac{x}{2} + V_2 \cdot \frac{10.000 - x}{2}$$

onde:

$$V = 10.000 \cdot 0,20 \cdot 12$$

$$V_1 = 0,20 \cdot 12 \cdot x$$

$$V_2 = 0,20 \cdot 12 (10.000 - x)$$

Então:

$$10.000 \cdot 0,20 \cdot 12 (DMT) =$$

$$= 0,20 \cdot 12 \cdot \frac{x^2}{2} + 0,20 \cdot 12 \cdot \frac{(10.000 - x)^2}{2}$$

ou

$$10.000(DMT) = \frac{x^2}{2} + \frac{(10.000 - x)^2}{2} \quad (1)$$

ou

$$DMT = \frac{x^2 + (10.000 - x)^2}{20.000} \quad (2)$$

Igualando a zero a derivada 1a. da função de x acima e verificando que é positiva a derivada 2a., tem-se o valor de x para o DMT mínimo:

$$(DMT)' = \frac{2x - 2(10.000 - x)}{20.000} = 0 \quad (3)$$

$$x - 10.000 + x = 0 \quad \therefore 2x = 10.000$$

$$x = 5.000$$

Assim, a usina deverá ficar localizada no km 5.

49 Neste caso, além do transporte da mistura, devem ser considerados o transporte de solo da jazida J1 para a usina e o transporte de brita da pedreira P1 para a usina.

Então, temos os seguintes momentos de transporte:

a) Mistura (da usina para a pista)

$$(MT)_m = V \cdot \frac{x^2 + (10-x)^2}{20}$$

b) Brita (da pedreira P1 para a usina)

$$(MT)_b = 0,7 \cdot V \cdot x$$

c) Solo (da jazida J1 para a usina)

$$(MT)_s = 0,3 \cdot V \cdot (10-x)$$

O momento de transporte total será:

$$\begin{aligned} MT &= (MT)_m + (MT)_b + (MT)_s = \\ &= V \cdot \frac{x^2 + (10-x)^2}{20} + 0,7 \cdot V \cdot x + 0,3 \cdot V \cdot (10-x) \\ MT &= \frac{V}{20} [x^2 + (10-x)^2 + 14x + 8(10-x)] \end{aligned}$$

(a)

Igualando a zero a derivada primeira de MT e verificando-se ser positiva a derivada segunda, calcula-se o valor de x.

$$(MT)' = \frac{V}{20} [2x - 2(10-x) + 14 - 6] = 0$$

$$\text{Então: } 2x - 20 + 2x + 14 - 6 = 0$$

$$\text{ou } 4x = 12 \therefore x = 3$$

Logo, a usina deverá ficar no km 3 para se obter o momento de transporte mínimo.

59 A DMT final, estando a usina localizada no km 3, será obtida a partir da igualdade (4):

$$MT = V \cdot (DMT) = \frac{V}{20} [x^2 + (10-x)^2 + 14x + 6(10-x)]$$

$$\text{para } x = 3$$

$$DMT = \frac{1}{20} (9+49+42+42) = \frac{182}{20} = 7,1 \text{ km}$$

Então

$$\boxed{DMT = 7,1 \text{ km}}$$

62 a) Cálculo dos volumes a serem transportados:

$$\begin{aligned} \text{- mistura: } &10.000 \text{ m} \cdot 0,20 \text{ m} \cdot 12 \text{ m} = \\ &= 24.000 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{- solo : } 0,3 \cdot 24.000 \text{ m}^3 = 7.200 \text{ m}^3$$

$$\text{- brita : } 0,7 \cdot 24.000 \text{ m}^3 = 16.800 \text{ m}^3$$

b) Distâncias médias de transporte a serem consideradas:

- mistura (da usina para a pista) conforme o item 59:

$$DMT = 7,1 \text{ km}$$

- solo (da jazida para a usina)

$$DMT = 10,3 \approx 7 \text{ km}$$

- brita (da pedreira para a usina)

$$DMT = 3 \text{ km}$$

- c) Produção de 1 caminhão em cada caso:

- transporte de mistura

$$P_m = \frac{200}{3,4 \times 7,1 + 5} = \frac{200}{25,14} = 6,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

- transporte de solo

$$P_s = \frac{200}{8 \times 7 + 5} = \frac{200}{61} = 3,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

- transporte de brita

$$P_b = \frac{200}{8 \times 3 + 5} = \frac{200}{29} = 6,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

- d) Cálculo do tempo necessário para que o transporte seja feito por 1 caminhão:

- transporte de mistura

$$T_m = 24.000 \text{ m}^3 : 6,8 \text{ m}^3/\text{h} = 3.478,3 \text{ h}$$

- transporte de solo

$$T_s = 7.200 \text{ m}^3 : 3,3 \text{ m}^3/\text{h} = 2.181,8 \text{ h}$$

- transporte de brita

$$T_b = 16.800 \text{ m}^3 : 6,8 \text{ m}^3/\text{h} = 2.434,7 \text{ h}$$

- e) Cálculo do número de horas disponíveis para realizar o transporte.

De acordo com o cronograma do Anexo 2 e levando em conta 25 dias x horas de trabalho por mês, dispõem-se dos seguintes prazos para a execução dos transportes:

- mistura:

$$\begin{aligned} 3 \text{ meses} \times 25 \text{ dias} \times 8 \text{ horas} &= \\ &= 600 \text{ horas} \end{aligned}$$

- solo:

$$\begin{aligned} 2 \text{ meses} \times 25 \text{ dias} \times 8 \text{ horas} &= \\ &= 400 \text{ horas} \end{aligned}$$

- brita:

$$\begin{aligned} 3 \text{ meses} \times 25 \text{ dias} \times 8 \text{ horas} &= \\ &= 600 \text{ horas} \end{aligned}$$

- f) Cálculo do número de caminhões

- transporte de mistura

$$3.478,3 : 600 \text{ h} = 5,8 \text{ ou } 6 \text{ caminhões}$$

- transporte de solo

$$2.181,8 : 400 \text{ h} = 5,4 \text{ ou } 5 \text{ caminhões}$$

89 Cronograma de utilização do equipamento

Com base no cronograma proposto (Anexo 2) e na quantidade de caminhões obtida no item anterior, o cronograma de utilização do equipamento será o seguinte:

| NATURAZA DO TRANSPORTE | QUANTIDADE DE CAMINHÕES | | | |
|------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|
| | 1º Mês | 2º Mês | 3º Mês | 4º Mês |
| BRITA | 4 | 4 | 4 | - |
| SÓLO | 6 | 6 | - | - |
| MISTURA | - | 6 | 6 | 6 |
| TOTAL | 10 | 16 | 10 | 6 |

90 Sugestão sobre alteração do cronograma

Pelo quadro do item anterior, verifica-se que no 2º mês devem ser colocados mais 5 caminhões e que no 3º mês ficam disponíveis 6. Um resultado melhor se obterá se o transporte de solo for estendido até o 3º mês, utilizando-se então 6 caminhões no 1º mês, 3 no 2º mês e 3 no 3º mês.

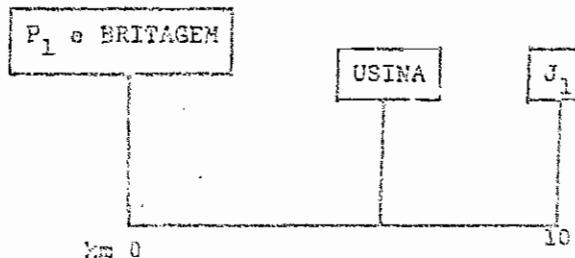
Assim, o total de caminhões em cada mês será:

$$1º \text{ mês: } 4 + 6 = 10 \text{ caminhões}$$

$$\begin{aligned} 2º \text{ mês: } 4 + 3 + 5 &= 12 \text{ caminhões} \\ 3º \text{ mês: } 4 + 3 + 5 &= 12 \text{ caminhões} \\ 4º \text{ mês: } 5 &= 5 \text{ caminhões} \end{aligned}$$

ANEXO 2

a) Localização dos materiais



b) Características da base

Início: Km 0

Fim : Km 10

Espaçatura: 20 cm

Largura : 12 m

c) Produção P em m³/h de 1 caminhão LK-1113 de 145 HP com capacidade de 4 m³

no transporte de solo

$$\text{e de brita: } P = \frac{200}{8x + 5}$$

no transporte de mis-

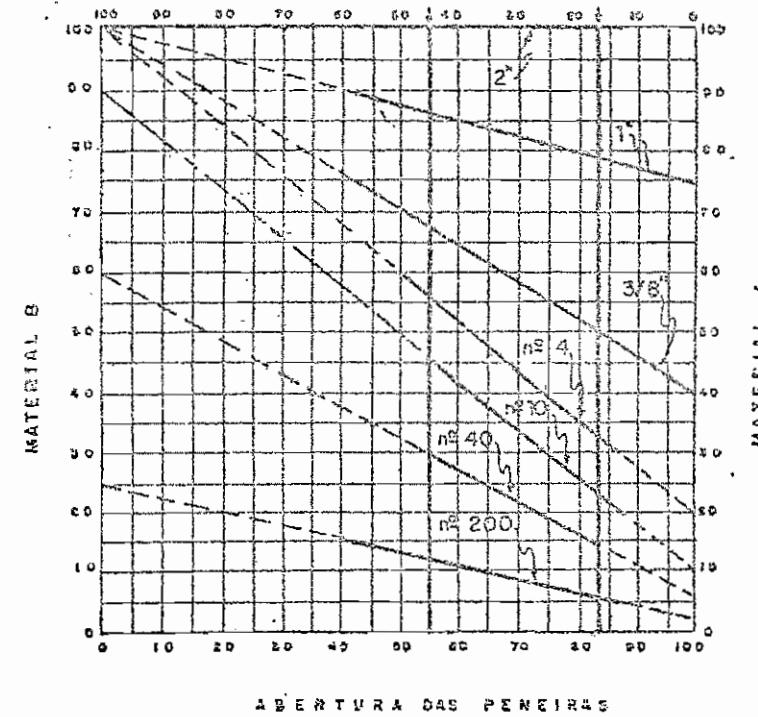
$$\text{tura: } P = \frac{200}{3,4x + 5}$$

onde x é a distância média de transporte.

d) Cronograma para transporte dos materiais

| | | MÊS | | | |
|---------|-------|-------|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| BRITA | P1 | Usina | | | |
| SOLO | J1 | Usina | | | |
| MISTURA | Usina | Pista | | | |

MISTURA DE AGRREGADO
% DE MISTURA(A+B)



ABERTURA DAS PENEIRAS

| PENEIRAS | % PASSANDO EM PESO | | | | | |
|----------|--------------------|----|------------|----|---------|----------------------------|
| | MATERIAL-A | | MATERIAL-B | | MISTURA | GRANULOMETRIA ESPECIFICADA |
| | GRAN. | % | GRAN. | % | | |
| 2" | 100 | 70 | | 30 | 100 | 100 |
| 1" | 75 | 53 | | 30 | 83 | 83 75-90 |
| 3/8" | 40 | 28 | | 30 | 58 | 58 40-75 |
| n° 4 | 20 | 14 | 100 | 30 | 44 | 45 30-60 |
| n° 10 | 10 | 7 | 90 | 27 | 34 | 33 20-45 |
| n° 40 | 6 | 4 | 60 | 18 | 22 | 23 15-30 |
| n° 200 | 3 | 2 | 25 | 8 | 10 | 10 5-15 |
| IL | NL | - | - | 37 | - | - |
| IP | NP | - | - | 7 | - | - |

COMPOSIÇÃO DE MISTURA

Anexo 1

| MAT. A | MAT. B |
|--------|--------|
| 70% | 30% |