

A UTILIZAÇÃO DE CASCALHO DE TERRAÇO NA BARRAGEM DE SÃO SIMÃO*

The use of Terrace Gravels at São Simão Dam

por

CLÁUDIO JOSÉ MADUREIRA**

RESUMO – Comparações entre ensaios de compactação com amostras integrais e amostras reduzidas representativas das granulometrias totais, em que foram verificadas a influência da Energia de Compactação, Tamanho Máximo das Partículas, Humidade de Absorção da Fracção graúda e Percentagem de Cascalho, bem como a execução de Aterros Experimentais utilizando equipamento de compactação do tipo vibratório-liso, permitiram o desenvolvimento de um método de controlo para a compactação do “cascalho de terraço” utilizado em larga escala na Barragem de São Simão, Brasil.

SYNOPSIS – Comparison between compaction tests with integral samples and tests with reduced samples representative of total grain size curves, in which were verified the influence of factors like Compaction Energy, Maximum Grain Size, Moisture Content of coarse grains, and Gravel Content, as well as the construction of Test Fills using smooth-drum vibratory rollers, made possible the development of a compaction control method for the terrace gravels extensively used at São Simão Dam in Brazil.

1 – INTRODUÇÃO

O emprego de materiais contendo cascalho em obras de engenharia, tem-se revelado invariavelmente uma excelente solução, sendo inúmeras as grandes barragens já executadas com tais materiais. No Brasil o seu emprego tem-se restringido quase que exclusivamente à composição de bases para rodovias, sendo pequena a experiência local sobre as suas características de compactação e

* Manuscrito recebido em Outubro 1976. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

** SONDOTÉCNICA S.A. – Rio de Janeiro.

resistência ao cisalhamento. A utilização de cerca de 10 milhões de metros cúbicos de cascalhos argilosos compactados na barragem de terra do Aproveitamento Hidroeléctrico de São Simão, permitiu a execução de estudos intensivos sobre as características de compactação, resistência e permeabilidade deste material, utilizando-se equipamentos de ensaio de grandes dimensões desenvolvidos na própria obra. Embora as pesquisas realizadas se tenham baseado em grande parte na literatura técnica existente, a sua execução não só permitiu à equipa de controlo dominar completamente as técnicas de ensaio com grandes amostras, como resultou no desenvolvimento de uma tecnologia própria de controlo para esse material.

A apresentação e discussão dos resultados obtidos durante estas pesquisas são objecto do presente trabalho.

2 – FORMA DE OCORRÊNCIA

As jazidas de cascalho que ocorrem no curso médio do rio Paranaíba, onde se localiza a barragem de São Simão, encontram-se a cerca de uma centena de metros acima do leito actual do rio. Ao contrário do que ocorre com frequência em materiais aluvionares, nesses depósitos o material graúdo apresenta-se totalmente preenchido por um material areno-argiloso de cor castanho-amarelada. O perfil típico desses depósitos mostra o cascalho quase sempre coberto por um material aluvionar constituído de areia argilosa de cor castanha, sendo comum a ocorrência de um material concrecionado de natureza ferruginosa (canga) no contacto entre essas duas camadas. Aos depósitos de cascalho seguem-se normalmente camadas de material areno-argiloso ou de areia fina, não tendo as investigações prosseguido a maiores profundidades. Os depósitos de cascalho chegam a atingir espessuras de 10 metros, o mesmo ocorrendo com a camada de material sobrejacente, embora em alguns lugares se encontre o cascalho junto à superfície.

O cascalho de São Simão consiste num material bem graduado (GW-GC) contendo uma percentagem de partículas graúdas (retida na peneira n.º 4) variando entre 30 e 70%, e cerca de 20% de material passando na peneira n.º 200. As partículas graúdas são de forma arredondada a sub-arredondada e alcançam um tamanho máximo de, em média, 10 cm, sendo constituídas por materiais quartzo-quartzíticos (70%), arenito, calcedónia e opala. O material da matriz (fracção inferior à peneira n.º 4) é de natureza areno-argilosa de baixa plasticidade

(SC-CL) e as suas características variam muito pouco tanto em planta como em profundidade. De um modo geral são as seguintes as características do material da matriz (Fig. 1):

- Limite de liquidez – 20 a 35%
- Índice de plasticidade – 5 a 15%
- Densidade dos grãos – 2,80 a 2,90
- Percentagem <# 200 – 35 a 50%

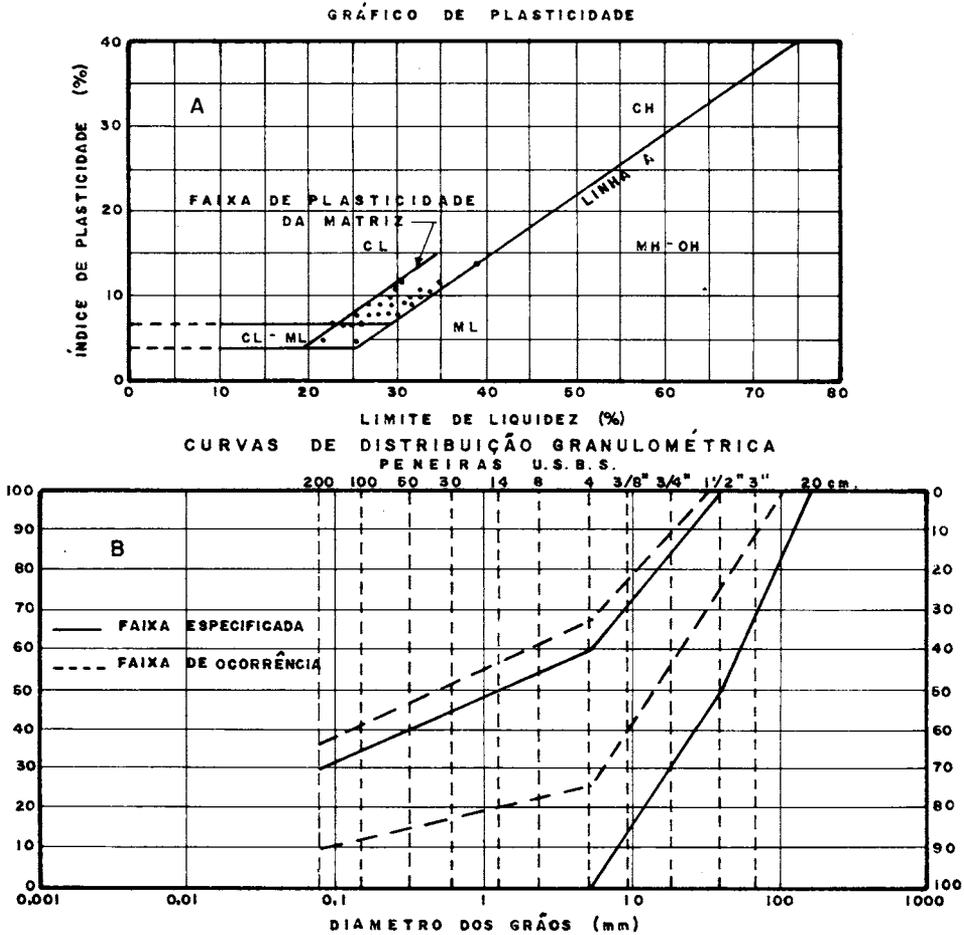


Fig. 1 – Características de granulometria e plasticidade do material estudado

O material gráudo tem características variáveis segundo a sua composição mineralógica, mas em média a densidade das suas partículas varia entre 2,50 e 2,60 e a absorção (material saturado-superfície seca) entre 1,0 e 3,0%. Alguns constituintes mais porosos, como a opala e o arenito, são de menor densidade e chegam a absorver cerca de 10% de humidade, não chegando porém a influenciar substancialmente o comportamento do material total, por ser, geralmente, pequena a sua percentagem.

No seu estado natural, a densidade deste material situa-se em torno de 1,8 a 2,0 g/cm³ e a sua humidade entre 6 e 10%, o que corresponde a cerca de 10 a 14% de humidade para a fracção fina. Estes valores situam-se em torno da humidade óptima de compactação para este material, como se verá mais adiante.

3 – PROGRAMAS E TÉCNICAS DE ENSAIOS

Na normalização dos ensaios executados com o cascalho de terraço procurou-se seguir, sempre que possível, as normas existentes para a execução de ensaios com materiais semelhantes. Assim, apresenta-se a seguir apenas uma descrição geral do procedimento de execução dos ensaios de compactação e de densidade *in situ*, bem como dos aterros experimentais.

3.1 – Ensaio de compactação

O ensaio de compactação de materiais contendo cascalho foi normalizado pelo U.S.B.R. na sua especificação E-38. O processo de preparação do material a ser ensaiado consiste em separá-lo previamente em duas fracções por meio da peneira n.º 4, sendo preparadas cinco amostras granulometricamente idênticas da fracção gráuda, às quais é adicionada posteriormente a fracção fina com os teores de humidade adequados à execução do ensaio de compactação. Devido à impossibilidade de se obter uma amostra não segregada para a determinação do teor de humidade do material, esta é feita com base na humidade dos finos e calculada a partir da equação:

$$h_t = h_c p_c + h_f p_f \quad (1)$$

onde:

- h_t – humidade da amostra total
- h_c – humidade de absorção do cascalho
- h_f – humidade dos finos
- P_c e p_f = percentagens de cascalho e de finos

TABELA I
PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE COMPACTAÇÃO

Diâmetro Nominal do Molde	Molde			Soquete			
	Diâmetro (cm)	Altura útil (cm)	Volume (cm ³)	Peso (kg)	Altura de Queda (cm)	Diâmetro da Base (cm)	Energia/Área (kg cm/cm ²)
4"	4"	4,6"	945	5,5lb	12"	2"	3,8
6"	6"	4,6"	2.120	10lb	18"	2"	10,4
30 cm	30,4	38,4	28.340	37,2	45,6	14,7	10,0
50 cm	51,1	38,0	77.700	30,5	46,3	24,0	5,2
CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO							
Energia de Compactação	Tamanho do Molde						
	4"	6"	30 cm	50 cm			
Normal	3 x 25 *	3 x 55 *	3 x 33	3 x 67			
Intermediária	4 x 40 *	4 x 30 **	4 x 51	4 x 102			
Modificada	5 x 25 **	5 x 55 **	5 x 91	—			

* Soquete de 5,5 lb

** Soquete de 10 lb

Obs.: Os produtos expressam a relação n.º de camadas × n.º de golpes.

Em São Simão considerou-se a humidade de absorção do cascalho como nula, mas, no caso de esta ser elevada o material graúdo deverá ser previamente saturado, considerando-se a sua humidade como a determinada com o material na condição saturada-superfície seca. De modo geral utilizou-se uma energia de compactação de 12,2 kg cm/cm³ que foi chamada de energia intermediária, e foi obtida compactando o material em 4 camadas, com 102 golpes de um soquete de 50 kg, num molde de 50 cm de diâmetro, para materiais com tamanho máximo de 3". Para as granulometrias de menor tamanho máximo outros diâmetros de molde e pesos de soquete foram usados conforme resumido na Tabela I. Durante os estudos foram executados ensaios utilizando outros níveis de energia de compactação correspondentes aos ensaios Normal e Modificado.

O programa de ensaios visou a obtenção de informações sobre a influência na compactação de factores como a percentagem de cascalho, o tamanho máximo das partículas, o tamanho do molde, a energia de compactação e a saturação das partículas graúdas. A maioria dos ensaios de compactação foi executada em séries com percentagens de cascalho de 30, 40, 50, 60 e 70%. O programa dos ensaios de compactação encontra-se relacionado na Tabela II.

TABELA II

Energia de Compactação	Tamanho Máximo	Diâmetro do Molde	Porcentagem de Cascalho
Normal	3/4"	6"	0, 30, 40, 50, 60, 70
Normal	1 1/2"	30 cm	0, 30, 40, 50, 60
Intermediária	3/4"	4"	0, 30, 40, 50, 60
Intermediária	3/4"	6"	0, 30, 40, 50, 60, 65, 70
Intermediária	1 1/2"	6"	0, 30, 40, 50, 60
Intermediária	1 1/2"	30 cm	0, 30, 40, 50, 60, 70
Intermediária	3"	30 cm	0, 30, 40, 50, 60, 70
Intermediária	3"	30 cm	0, 30, 40, 50, 60, 70
Modificada	3/4"	6"	0, 30, 40, 50, 60, 70
Modificada	1 1/2"	30 cm	0, 30, 40, 50, 60, 65, 70
Modificada	1 1/2"	30 cm	0, 30, 50, 65
Modificada	3"	30 cm	0, 40, 50, 60, 65, 70
ASTM-D 2049 (vibração)	3/4", 1 1/2" e 3"	6" e 28 cm	100

3.2 – Ensaios de densidade *in situ*

Os ensaios de densidade *in situ* foram executados pelo método do volume de água, o qual consiste na escavação de um poço no material compactado, usando-se como gabarito um anel metálico de 50cm de diâmetro fixo à superfície do terreno. O volume do material é medido revestindo-se o furo e o anel com uma folha de plástico e enchendo-se este volume com água de um tambor graduado até ao nível indicado por um pino de referência fixo. O poço deve atravessar toda a camada compactada e ter forma cilíndrica. A amostra colectada é armazenada num recipiente provido de tampa, sendo levada para o laboratório para determinação de seu peso e teor de humidade, após o que é submetida a uma análise granulométrica por peneiramento.

3.3 – Pistas experimentais

Com o objectivo de obter valores de compactação do cascalho de terraço com espessuras de camada e números de passadas diferentes dos utilizados como rotina de construção na zona de transição da barragem de terra, foram executadas duas pistas experimentais correspondendo aos dois equipamentos em utilização nos aterros deste material. Estas pistas não foram construídas numa operação contínua, mas aproveitando o equipamento disponível nos próprios aterros em

lançamento, e foram por este motivo incluídas no corpo da barragem. Desta maneira, numa determinada camada em lançamento era reservada uma área de aproximadamente 50 x 15 m, a qual era escolhida em função do melhor nivelamento e regularidade da sua superfície. Neste local, ao contrário das especificações, a superfície da camada inferior era deixada sem escarificação de modo a poder-se executar o ensaio de densidade sem ultrapassar os limites da camada em estudo, e medir exactamente a espessura compactada do material no local do ensaio.

As espessuras das camadas lançadas situaram-se em torno de 20, 30 e 40 cm, e cada camada foi compactada em faixas paralelas submetidas a 2, 4, 6, 8 e, excepcionalmente, 10 passadas do equipamento em observação. Em cada faixa de compactação foram executados três ensaios de densidade pelo “método do volume de água”, guardando distâncias de aproximadamente 10 m entre si. Para cada combinação de espessura \times número de passadas foi obtido um número mínimo de nove resultados, o que é considerado o mínimo permissível para executar-se uma análise estatística.

O material foi lançado conforme foi escavado da jazida sem ser submetido a qualquer tratamento de humidade, tendo-se tomado apenas o cuidado de evitar o lançamento de materiais de frentes de escavação diferentes numa mesma camada. Para evitar interferência com os resultados fornecidos pelos equipamentos de compactação, evitou-se rigorosamente o tráfego dos equipamentos de transporte por cima do material lançado.

Com o objectivo de se implantar um controlo de compactação do cascalho de terraço, estabeleceu-se uma rotina de ensaios complementares ao ensaio de densidade *in situ*, colectando-se uma amostra de material adjacente ao furo para a execução dos seguintes ensaios:

- a) ensaio de compactação (Intermediário) da amostra do material total cuja fracção + 3/4” foi substituída por igual percentagem da fracção - 3/4” + # 4;
- b) ensaio de compactação (Normal) da amostra da fracção - 3/4” do material total, composta no laboratório;
- c) ensaio de compactação (Normal), segundo o Método de Hilf, com material da fracção - 3/4” preparado no campo.

A cada dez ensaios de densidade colectou-se uma amostra do material total com cerca de 800 kg para a execução dos seguintes ensaios adicionais:

- d) ensaio de compactação (Intermediário) da amostra do material total cuja fracção + 1 1/2” foi substituída por igual percentagem da fracção - 1 1/2” + # 4.
- e) ensaio de compactação (Proctor Normal) com a fracção inferior à peneira n.º 4.

A preparação das amostras para compactação no laboratório consiste na composição de materiais de curvas granulométricas baseadas na granulometria do material extraído do furo, considerado como material total, obtidas da seguinte maneira:

- a) no caso da substituição de determinada fracção, divide-se a percentagem de material superior ao tamanho indicado pelo número de fracções entre este tamanho e a peneira n.º 4, consideradas, e somam-se estas percentagens às percentagens de cada uma dessas fracções do material total;
- b) no caso da eliminação de determinada fracção, recalcula-se a granulometria do material total suprimindo-se do peso total da amostra o peso do material superior a determinado tamanho, obtendo-se desta maneira a granulometria da fracção inferior a este tamanho.

Em ambos os casos são compostas cinco amostras idênticas para a execução do ensaio de compactação, sendo o material de cada fracção considerado pesado na proporção correcta, de modo que a sua mistura resulte numa quantidade de material suficiente para o corpo de prova compactado e a amostra de humidade;

- c) no caso do ensaio rápido pelo método de Hilf o material é simplesmente passado na peneira de 3/4", homogeneizado e quarteado, visando a obtenção de amostras da fracção - 3/4" com o mínimo de perda de humidade.

O objectivo da execução desses ensaios foi a verificação da possibilidade de se controlar a compactação do material total por meio do grau de compactação relacionado à densidade máxima obtida substituindo-se a fracção superior a um determinado tamanho, ou por meio da compactação atingida por uma determinada fracção do material em relação a uma energia de compactação considerada. O emprego do Método de Hilf seria uma variante desta segunda proposição.

4 – CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO DO CASCALHO DE TERRAÇO

4.1 – *Resultados obtidos*

Os resultados dos ensaios de compactação situaram-se entre 2,00 e 2,25 g/cm³, para percentagens de cascalho variando entre 30 e 70%, considerando-se as três energias de compactação utilizadas. As humidades óptimas correspondentes situaram-se entre 10,7 e 5,0% para o material total, e entre 18,8 e 11,3% para o material da matriz. Os finos atingiram densidades entre 1,62 e 2,00 g/cm³ quando o material total foi compactado na sua densidade máxima.

Considerando-se os valores médios de todos os ensaios de compactação executados com a energia intermediária, obtiveram-se as densidades máximas de 2,08, 2,11, 2,15, 2,18 e 2,21g/cm³, respectivamente para 30, 40, 50, 60 e 70% de cascalho. Tais valores têm importância como valores médios de densidade a atingir nos aterros compactados uma vez que os resultados de compactação de campo são referidos a tal energia. Entre 30 e 70% de cascalho observa-se, em especial para esta energia, um acréscimo de cerca de 0,035g/cm³ na densidade, correspondendo a um acréscimo de 10% na quantidade de material graúdo, numa relação aproximadamente linear. Conforme já observado por outros autores, as densidades máximas mostraram-se crescentes com a percentagem de cascalho e atingiram o seu valor máximo entre 65 e 70% para todas as granulometrias ensaiadas.

Os resultados dos ensaios de compactação são apresentados na Tabela A, separados por séries de diferentes combinações de Energia de Compactação, Diâmetro de Molde, Tamanho das Partículas e Percentagem de Cascalho.

4.2 – Considerações gerais

4.2.1 – Compactação em laboratório

Os resultados do item anterior permitem observar a influência de vários factores nas características de compactação do cascalho de terraço. Estes factores são a seguir considerados separadamente:

a) Energia de compactação

A influência da energia de compactação na densidade máxima alcançada por este material foi verificada por meio da execução das séries 1, 4, 9 e 2, 6, 10, utilizando-se tamanho de molde adequado à máxima dimensão das partículas. Pode-se observar (Fig. 2) que a diferença entre as densidades máximas resultantes da compactação de materiais de mesma granulometria com as energias normal e intermediária, é aproximadamente constante e igual a 3%. Ao passar-se porém à energia modificada, embora o acréscimo de densidade do material da matriz se situe em torno de 3%, com o aumento da percentagem de cascalho observa-se um decréscimo relativo nas densidades máximas, alcançando-se entre 65 e 70% a mesma densidade máxima da energia intermediária. Assim, verifica-se que embora a interferência entre as partículas comece a se fazer notar a partir de aproximadamente 30%,

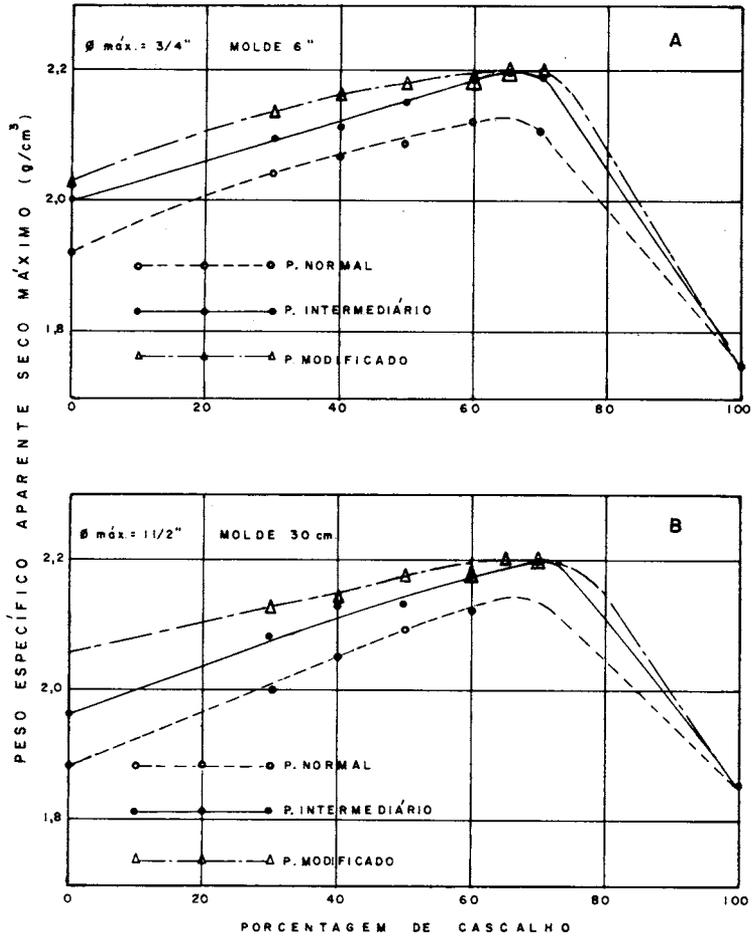


Fig. 2 – Influência da energia de compactação

a baixos níveis de energia esta interferência não impede a obtenção de acréscimos de densidades mais ou menos proporcionais aos acréscimos de energia de compactação, apesar do aumento da fracção graúda, enquanto que ao atingir-se níveis mais elevados de energia passa a haver um impedimento físico à densificação, resultante da impossibilidade de se obter um melhor arranjo entre as partículas. Desta maneira aos acréscimos de energia passam a corresponder cada vez menores aumentos de densidade, sendo possível que a níveis ainda mais elevados, a impossibilidade de se atingir arranjos mais densos, combinada à quebra de partículas, conduza inclusive à obtenção de menores densidades.

b) *Tamanho máximo das partículas*

A influência do tamanho máximo das partículas foi verificada pela execução das séries 1 e 2, 4, 6 e 8 e 9 e 10, todas executadas em moldes de tamanhos adequados ao tamanho das partículas. Descontando-se o facto de que nem sempre as matrizes compactaram às mesmas densidades, pode-se observar (Fig. 3) que as densidades máximas alcançadas são praticamente iguais até uma determinada percentagem de cascalho. As diferenças existentes a partir deste ponto podem ser atribuídas ao aumento da uniformidade da fracção graúda do material, e consequentemente ao aumento da interferência entre as suas partículas.

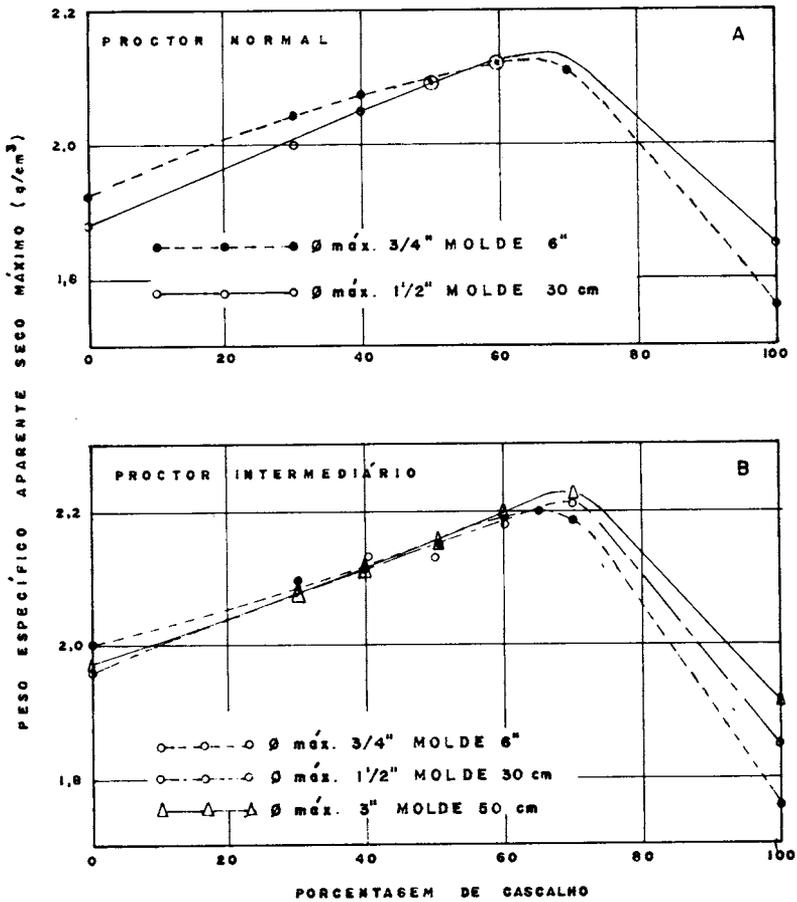


Fig. 3 - Influência do tamanho máximo das partículas

As séries executadas com a energia intermediária são as que permitem uma melhor observação deste comportamento, e na Tabela III são apresentados alguns resultados de ensaios simultâneos (executados com materiais de idênticas granulometrias e nas mesmas condições de humidade) executados com esta energia, onde esta tendência pode ser melhor visualizada.

TABELA III

Tamanho Máximo	Densidade Máxima - (g/cm ³) Porcentagem de Cascalho		
	40%	50%	60%
3/4"	2,09	2,12	2,15
1 1/2"	2,09	2,14	2,16
3"	2,09	2,14	2,18

Tomando-se por base as densidades atingidas pelo material de tamanho máximo 3", pode-se observar que para esta energia de compactação as densidades máximas são invariáveis até cerca de 40%, independentemente do tamanho máximo das partículas. A partir desta percentagem o material de 3/4" passa a ter reduzidos os seus acréscimos de densidades com a percentagem de cascalho, chegando a redução relativa ao material padrão (3") a atingir 0,9% para 50% e 1,4% para 60% de cascalho. Já para o material de tamanho máximo 1 1/2" esta diferença entre as densidades máximas só começa a ser observada a partir de 50% de cascalho, e atinge 0,9% com 60% de cascalho. Embora não tenham sido feitos ensaios com tamanhos de partículas superiores a 3", é possível que a influência da uniformidade da fracção graúda também se faça sentir a partir de 60% com o material de 3".

Deve-se observar que essas constatações são de grande interesse no que respeita ao controlo de compactação deste material.

c) *Humidade de absorção na fracção graúda*

A especificação E 38 do USBR recomenda que a fracção graúda do material a ser compactado seja saturada e seca superficialmente antes da sua mistura ao material fino. Esta saturação tem por objectivo evitar que a fracção graúda absorva uma quantidade desconhecida de humidade da matriz, prejudicando a correcta determinação das densidades. No entanto a operação de saturação e secagem

superficial aumenta substancialmente o trabalho de preparação das várias amostras para compactação, além de modificar a humidade da matriz devido à impossibilidade de se obter uma boa secagem superficial das partículas menores da fracção graúda, ocasionando a obtenção de pontos mal posicionados para a determinação da curva de compactação do material.

Por este motivo procurou-se verificar qual a influência da saturação desta fracção nas densidades obtidas; na série 14, executada com esse objectivo, dois materiais típicos da jazida de cascalho, um deles com densidade absoluta da fracção graúda igual a 2,59 e absorção 1,0% e outro com 2,56 e 3,0%, respectivamente, foram ensaiados. Assim, verificou-se que para o material de menor absorção a saturação da fracção graúda não interferiu com as densidades obtidas, enquanto que um pequeno decréscimo foi observado para o material de absorção um pouco maior. As densidades alcançadas com o material de maior densidade real foram superiores em cerca de 1,5% às obtidas com o outro material. Deve-se destacar que em ambos utilizou-se uma matriz de idênticas características.

Desta maneira, como se acredita que a humidade da fracção graúda por não ser estrutural não interfere com o processo de compactação, a execução dos ensaios de compactação com esta fracção seca parece ser o mais recomendável, pelo menos quando em presença de materiais de fraca absorção (e.g. inferior a 5%). Estas considerações sobre a absorção da fracção graúda são de grande interesse nos ensaios de compactação, uma vez que devido à limitação no tamanho das estufas a humidade das amostras de compactação não pode ser determinada com base no corpo de prova inteiro, mas sim lançando-se mão da equação (1), com base na humidade dos finos; tratando-se de materiais de fraca absorção a humidade da fracção pode ser considerada nula sem prejuízo para as determinações de densidade. Já em caso contrário, a impossibilidade de conhecer-se a quantidade de humidade que a fracção graúda pode absorver da matriz, faz com que seja preferível a saturação prévia desta fracção e a consideração de sua absorção saturada-superfície seca naquela fórmula.

d) *Considerações sobre a humidade de compactação*

Alguns autores consideram, para efeitos práticos, a humidade do material total como função da humidade óptima do material da matriz quando compactado com a mesma energia, conforme relação expressa pela equação (1), onde a humidade óptima da matriz substitui a humidade dos finos. Esta relação na verdade conduz a

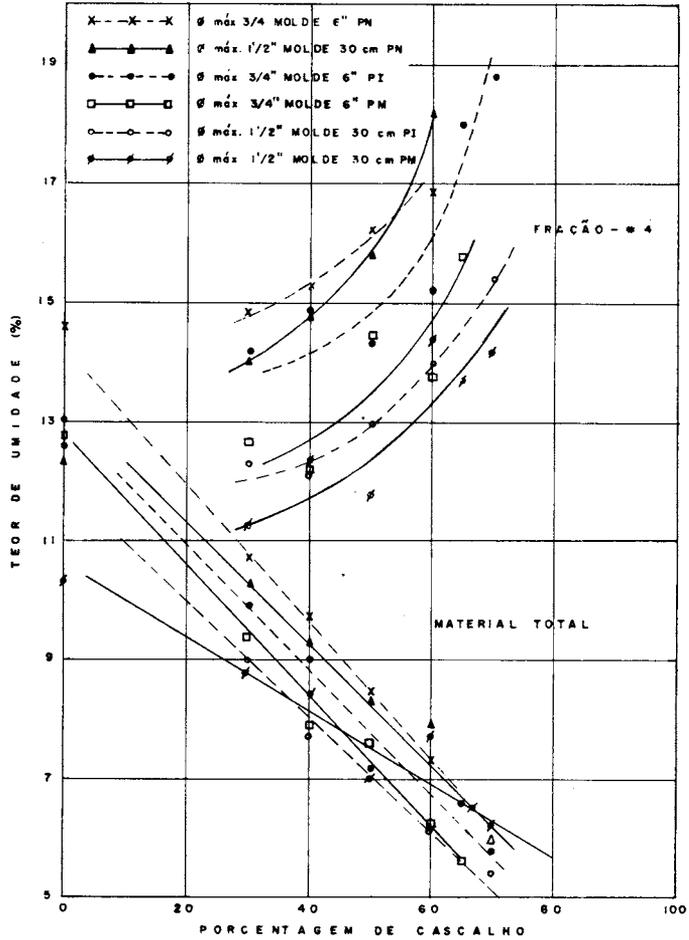


Fig. 4 – Relação entre o teor de humidade e a percentagem de cascalho

humidades óptimas totais inferiores às reais. Na Fig. 4, pode-se observar que, de facto, as humidades da matriz às quais correspondem as máximas densidades do material total a diferentes percentagens de cascalho, são crescentes a partir da humidade óptima da matriz. Em consequência a humidade óptima para o material total segue uma relação muito próxima à linear, a partir da humidade óptima para 0% de cascalho.

Esta variação da humidade da matriz que corresponde à humidade óptima do material total, está directamente relacionada com o problema da “absorção” da energia de compactação por parte da fracção gráuda, o que faz com que a energia

que efectivamente atinge a matriz decresça com o aumento nos teores de humidade da matriz que correspondem ao óptimo para o material total.

Com base em várias séries de ensaios executados para este material pode-se afirmar com bastante precisão que a humidade óptima do material total decresce na razão de 1% para cada 10% de acréscimo na percentagem de cascalho (Fig. 4).

Com respeito à influência da energia de compactação sobre a humidade óptima deste material, observa-se (Fig. 5) que, como era de se esperar, a humidade óptima diminui com o aumento da energia de compactação.

e) *Considerações sobre o nível de compactação atingido pelas fracções mais finas*

Embora se considere normalmente como matriz apenas o material de tamanho inferior à peneira n.º 4, vários autores apresentam tentativas de controlo de compactação deste material utilizando as fracções inferiores a 3/4", 1 1/2" ou a um outro tamanho qualquer determinado. Na verdade a utilização da peneira n.º 4 como separação entre as fracções fina e grossa de um material nem sempre é a mais conveniente, uma vez que a grande interferência entre as partículas de maior tamanho provoca um decréscimo contínuo nas densidades da fracção fina com o aumento da percentagem de cascalho. É evidente que ao exceder-se uma certa percentagem de material graúdo, a fracção fina encontrar-se-á completamente solta nos vazios da fracção graúda, os valores teoricamente calculados para a sua densidade sendo inferiores à sua densidade mínima possível (para o material estudado próxima a 1,6 g/cm³). Desta maneira a sua influência na compactação do material total dar-se-á apenas ao nível de dificultar os contactos entre as partículas graúdas.

Já a fracção - 3/4" do material total tem um comportamento bem diferente conforme pode ser observado na Fig. 6. Pode-se notar que as densidades atingidas por esta fracção acompanham o crescimento das densidades máximas do material total, atingindo o seu ponto máximo aparentemente à mesma percentagem de cascalho. Em consequência deste facto, a consideração da separação entre a fracção graúda e miúda do material total nesta peneira, pode mostrar-se mais aconselhável que a utilização da peneira n.º 4.

As observações feitas acima, aliadas à relativa facilidade em se executar ensaios de compactação com amostras da fracção - 3/4", são de enorme importância na execução de um controlo de compactação deste material, conforme se verá mais adiante.

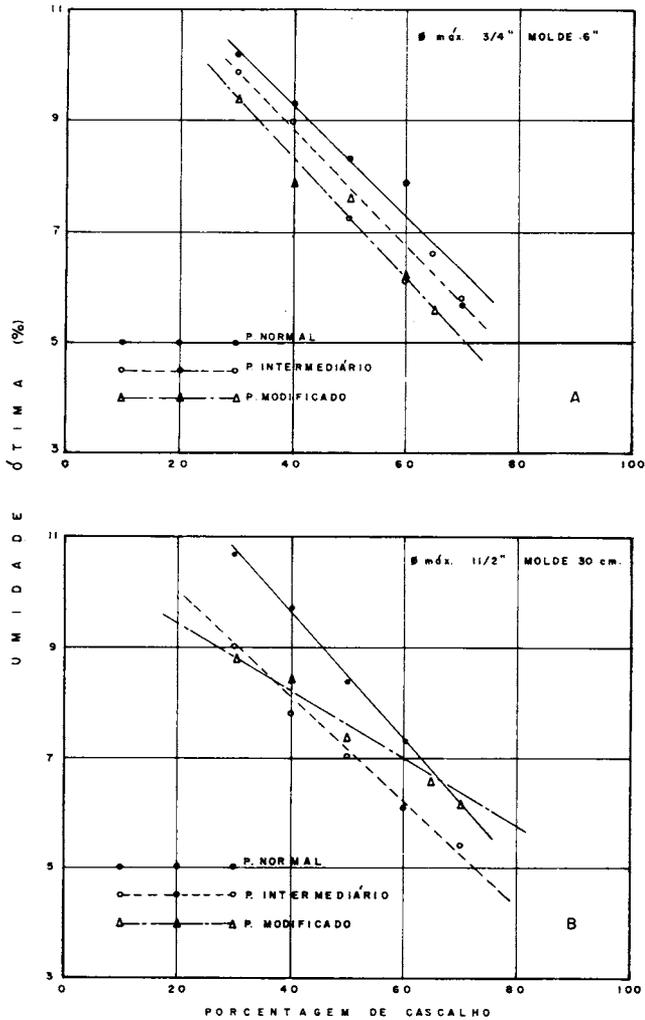


Fig. 5 – Influência da energia de compactação na humidade óptima do material total

f) *Percentagem de cascalho*

Os resultados discutidos nos itens anteriores mostram que o factor mais importante na compactação de materiais contendo cascalho é a percentagem com que esta fracção participa no material total. A influência do aumento da percentagem dessa fracção nas densidades máximas atingidas pelo material total e pelo material da matriz, bem como o ponto a partir do qual passam a ser

observados decréscimos dessas densidades máximas, já foram exaustivamente tratados por outros autores e não serão aqui mencionados.

5 – CONTROLO DE COMPACTAÇÃO

Os processos de controlo de compactação actualmente empregados baseiam-se na execução efectiva de ensaios de compactação com amostras do material empregado, utilizando-se artifícios para a determinação a curto prazo dos teores de humidade ou dos desvios em relação às humidades de compactação estabelecidas em função de uma determinada energia de compactação convencional.

Com a utilização de enormes volumes de materiais contendo partículas graúdas, os engenheiros encarregados do controlo tecnológico desses materiais viram-se face à dificuldade de realizar os controlos tradicionais, devido à impossibilidade prática da execução de ensaios expeditos com as grandes amostras necessárias à representação de granulometria com tamanhos máximos de partículas da ordem de dezenas de centímetros. A solução imediata foram as tentativas de controlo por meio de equações teóricas em que a densidade máxima era calculada pela média harmónica das densidades máximas atingidas por duas fracções em que o material era dividido, expressa pela fórmula:

$$\gamma_t = \frac{1}{\frac{P_f}{\gamma_{s \max}} + \frac{P_c}{G_c}} \quad (2)$$

onde:

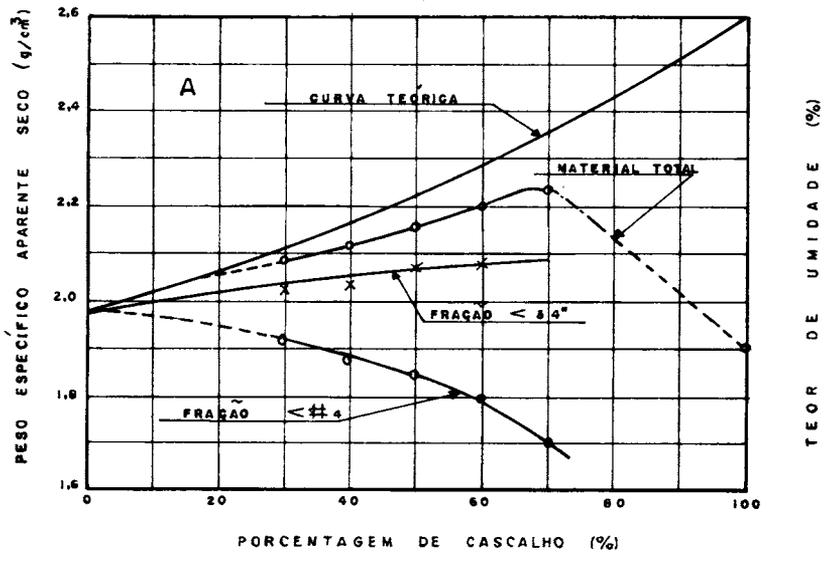
P_f e P_c – percentagens das fracções fina e graúda em que é separado o material;

$\gamma_{s \max}$ – densidade máxima dos finos para uma dada energia de compactação;

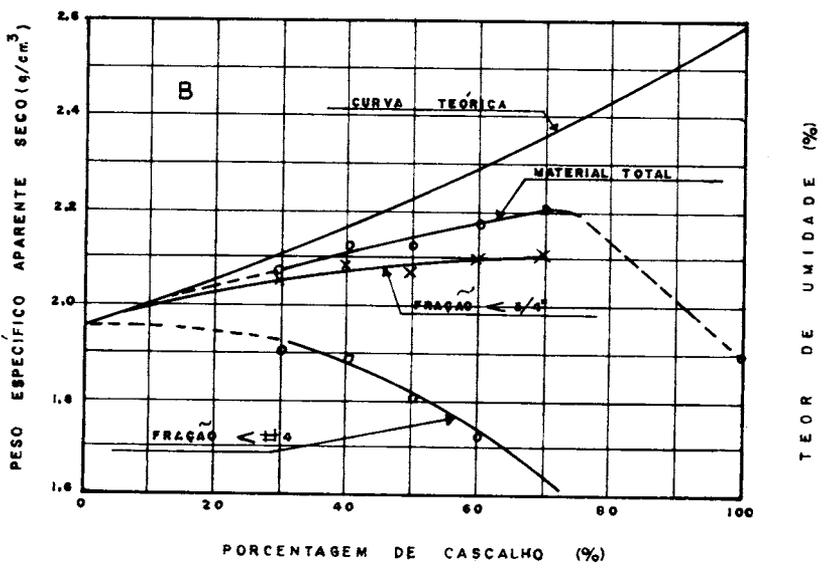
G_c – densidade das partículas da fracção graúda;

ou por meio de soluções empíricas, onde se chegava à densidade máxima do material total extrapolando-se os resultados obtidos com fracções da granulometria real por meio de inúmeros artifícios (Humphres – 1957, Gordon – 1964 e Frost – 1973).

A inadequação da fórmula teórica para granulometrias contendo mais do que 20 a 30% de partículas graúdas ficou demonstrada nas pesquisas desenvolvidas pelo USBR (Holtz e Lowitz) – 1957). Os métodos gráficos embora utilizados



PROCTOR INTERMEDIÁRIO ϕ MAX. 3" - MOLDE 50 cm.



PROCTOR INTERMEDIÁRIO ϕ MAX. = 1 1/2" - MOLDE 30 cm

Fig. 6 - Densidades alcançadas pelas frações do material total

pelos divulgadores, não parecem ter encontrado aceitação no meio técnico devido à sua complexidade.

O mesmo problema foi enfrentado pela equipa de controlo tecnológico em São Simão. O controlo executado com base simplesmente em ensaios de densidade *in situ* mostrou-se insatisfatório devido à já mencionada influência da granulometria neste parâmetro. Assim, durante a execução das pistas experimentais e dos ensaios de controlo rotineiros, o cumprimento do programa de ensaios descrito no item 3.3 conduziu aos resultados que são apresentados mais adiante. Com base nesses resultados foi possível a determinação da percentagem de compactação alcançada pelo material com base em dois processos diferentes:

a) relacionando a densidade do material total com a densidade máxima obtida com a amostra do material total em que a fracção superior a um determinado tamanho (1 1/2" ou 3/4") foi substituída por igual percentagem da fracção inferior a este tamanho e superior à peneira n.º 4; este processo pode ser chamado de *substituição da fracção + 1 1/2" ou + 3/4"*;

b) relacionando a densidade atingida por uma fracção (- 3/4") do material total com a densidade máxima desta fracção compactada a um nível de energia adequado; este processo pode ser chamado de *supressão da fracção + 3/4"*.

Neste trabalho os níveis de energia de compactação considerados são o intermediário para o material total e o normal para a fracção - 3/4".

5.1 – Resultados obtidos

Na Tabela B, além dos valores individuais das percentagens de compactação obtidas segundo os diferentes processos, encontram-se calculadas as diferenças entre estes valores de compactação obtidos para cada ensaio de densidade. Pode-se observar que esta diferença variou de -3,5 a +1,8% quando se comparou o processo de *substituição da fracção + 3/4"* com o de *supressão da fracção + 3/4"*, e situou-se em torno de 1,3% em valor absoluto, para a comparação entre o processo da supressão da fracção + 3/4" executado com base no Proctor Normal e o mesmo procedimento executado com base no método de Hilf com a fracção - 3/4".

5.2 – Considerações gerais

A utilização da energia intermediária como referência para a compactação

do cascalho de terraço justifica-se devido ao facto de que embora o acréscimo de energia seja superior a 100% ao utilizar-se a energia modificada, os acréscimos de densidades situam-se apenas entre 1,5 a 0,5% para percentagens de cascalho entre 40 e 70%, embora se obtenha um aumento substancial de densidade com materiais de granulação mais fina. Este comportamento do material sob a acção de energias de compactação crescentes já foi comentado anteriormente e pode ser observado na Fig. 2. Desta maneira a utilização de uma energia de compactação superior à do Proctor Intermediário resultaria num trabalho adicional não justificável para o material em estudo.

Por outro lado, tem-se observado que as densidades atingidas nos aterros deste material só excepcionalmente excedem o limite das densidades máximas obtidas nos ensaios executados com a energia intermediária, e que na pista experimental executada para o rolo vibratório CK-50, foram obtidos resultados de compactação de cerca de 100% para camadas de 20 e 30 cm compactadas com 6 e 8 passadas.

Com respeito ao controlo de compactação deste material, a execução de ensaios de compactação com a amostra total correspondente a cada um dos ensaios de densidade *in situ*, é impraticável em termos de rotina, uma vez que um material com tamanho máximo de partículas da ordem de 3", como é o caso, requer uma amostra de cerca de 1.000 kg para a execução de cada um desses ensaios. Descartado esse procedimento, a obtenção de uma curva média de densidades máximas como função da percentagem de cascalho, embora em termos médios não pareça conduzir a resultados muito diferentes dos reais, não obtém valores precisos em termos individuais (Tabela B). Esta imprecisão advém do facto de que embora a densidade do material total não seja muito afectada por variações de granulometria da sua fracção graúda, mantendo-se invariável a percentagem desta fracção, é grandemente afectada por variações de plasticidade e granulometria da fracção fina.

No entanto o controlo de compactação executado com base em amostras cuja fracção superior a um determinado tamanho foi substituída ou suprimida mostrou-se bastante conveniente, conduzindo a valores de compactação aparentemente muito próximos dos reais. Este procedimento tem ainda a seu favor a facilidade de execução dos ensaios devido ao menor tamanho das partículas das amostras a ensaiar.

a) *Substituição da fracção superior a um determinado tamanho*

A execução de ensaios de compactação ou de resistência ao cisalhamento

utilizando amostras representativas do material total, porém com menor tamanho máximo de partículas, é um artifício especificado por muitos autores e é mesmo a única maneira de executar ensaios com certos materiais de tamanhos de partículas muito grandes. No que respeita à compactação, a especificação D 1557 da ASTM estabelece que materiais com tamanhos de partículas superiores a 3/4" devem ter a sua fracção + 3/4" substituída por igual percentagem da fracção - 3/4" + # 4. Conforme já observado, a percentagem de material retido na peneira n.º 4 parece ser o factor de influência mais importante na compactação, desses materiais, e qualquer artifício de substituição modelo-protótipo deve procurar conservar invariável a percentagem de material retido nesta peneira. No entanto o tamanho máximo das partículas é também um factor importante na medida em que, tratando-se de granulometrias rectilíneas, é ele que regula a uniformidade da fracção graúda. Assim, observou-se (Tabela III) que o recurso da substituição da fracção superior à peneira 3/4" conduz a resultados correctos de compactação até cerca de 40%, e que para o tamanho máximo de 1 1/2" esta percentagem chega a 50%. Ao ultrapassar estas percentagens a granulometria da fracção graúda é muito uniforme e o aumento da interferência entre as suas partículas causa um decréscimo relativo nas densidades obtidas.

Com base nos ensaios de compactação da série 15 pode-se afirmar que o erro cometido quando se utiliza a substituição na peneira 3/4" é de cerca de 1% para 50% e 1,4% para 60% de cascalho. Desta maneira os resultados da tabela referentes ao controlo com base neste recurso não estão aparentemente afectados de erros muito grandes.

b) *Utilização da fracção - 3/4" do material total*

Durante a execução dos ensaios de compactação apresentados no item 4.1, verificou-se que as densidades atingidas pela fracção - 3/4" do material total compactado com a energia intermediária, eram muito próximas às densidades máximas atingidas pelo material desta fracção compactada com a energia normal, para percentagens de cascalho variando entre 30 e 60% (Fig. 7). Este facto deve-se à influência do material + 3/4" na compactação da fracção - 3/4"; quando a percentagem de cascalho é pequena, é também pequena a "absorção" de energia por parte deste material e a fracção - 3/4" atinge densidades superiores às do Proctor Normal. Esta interferência é crescente com a percentagem de cascalho, diminuindo, relativamente, a densidade desta fracção até atingir valores muito

próximos aos fornecidos pelo Proctor Normal, entre 40 e 50% de cascalho. Além desta percentagem as densidades da fracção $-3/4''$ são inferiores aos valores de densidades máximas deste ensaio. Deve-se observar no entanto que para os valores da Fig. 7 esta diferença não excede 1%.

Uma variação semelhante pode ser observada na Tabela B onde os resultados dos ensaios de compactação estão organizados em ordem crescente de percentagens de cascalho. Assim, a diferença entre as percentagens de compactação obtidas com base na substituição do material $+3/4''$ e com base na fracção $-3/4''$, variam entre $-3,5\%$ e $+1,8\%$, passando por zero entre 40 e 50%. No entanto como a partir de 40% as percentagens baseadas na substituição do material $+3/4''$ estão sujeitas a um erro para mais, na verdade as diferenças reais devem ser maiores do que 1% mesmo com percentagens de cascalho superiores a 50% (Fig. 8A). Os valores elevados de diferenças para menos observadas, correspondem a materiais com pequenas percentagens de cascalho (menores que 30 a 35%) e são devidas ao elevado nível de compactação atingido pela fracção $-3/4''$ como resultado da pequena percentagem de material $+3/4''$.

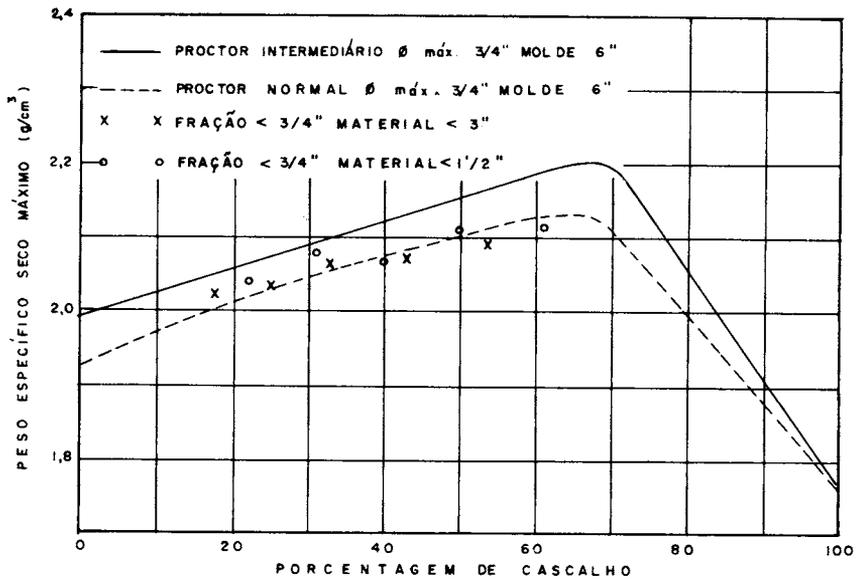


Fig. 7 - Comparação entre a densidade da fracção $<3/4''$ do material total e a sua densidade máxima

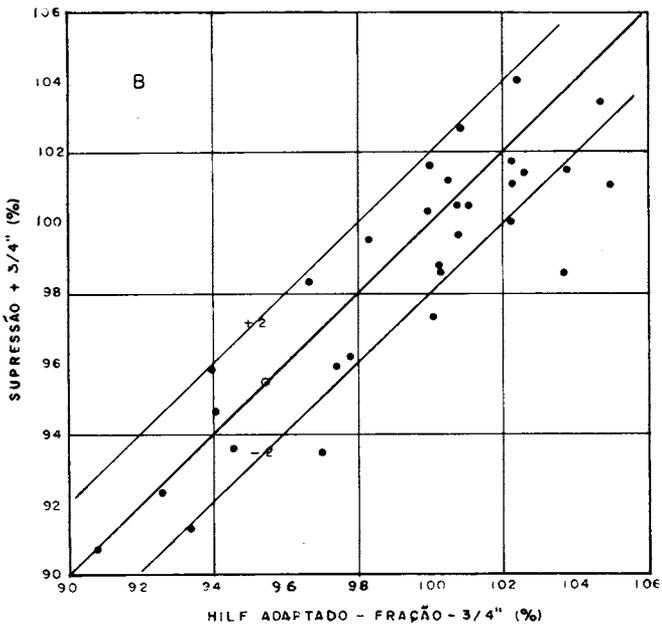
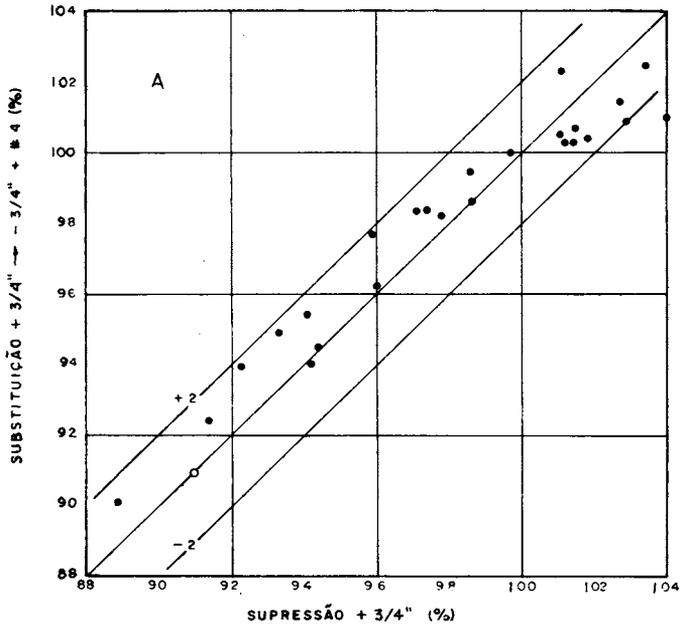


Fig. 8 - Comparação entre as diversas possibilidades de controlo de compactação

Com respeito aos ensaios com a fracção $-3/4''$ utilizando o método de Hilf, pode-se observar (Fig. 8-B) que apesar de problemas de segregação ocorridos com as amostras para este ensaio e de perdas severas de humidade devidas ao facto de o material ter sido levado ao laboratório para compactação, as diferenças entre os graus de compactação obtidos por este processo e pelo processo discutido no parágrafo anterior raramente excedem 2%.

c) *Controlo de compactação*

Com base nos resultados discutidos nos itens anteriores, é possível a execução de um controlo de compactação bastante satisfatório utilizando-se a densidade *in situ* do material total referida à densidade máxima de uma sua amostra na qual o material $+3/4''$ foi substituído por igual percentagem de fracção $-3/4'' + \# 4$, ou utilizando-se a densidade da fracção $-3/4''$ do material total, referida à sua densidade máxima quando compactada a níveis de energia adequados. Para o material em estudo, se se considerar suficiente para o material total atingir um nível de compactação próximo ao fornecido pela energia intermediária, a fracção $-3/4''$ deste material deve então ser referida à energia normal de compactação.

Uma vez que a precisão dos dois processos é função da percentagem de cascalho, o primeiro poderia ser empregado até percentagens que não excedessem 45%, enquanto que o segundo seria empregado a partir de 40% de cascalho. Materiais cujas percentagens de material graúdo excedessem cerca de 60 a 65%, fugiram à área de aplicação de aplicação do controlo proposto. A sobreposição entre as faixas de aplicação dos dois processos dá-se justamente no intervalo em que pode haver dúvida quanto à precisão de ambos. Neste intervalo o valor médio de compactação obtido pelos dois processos será, provavelmente, o mais próximo do valor real.

No caso de se precisar de um resultado a curto prazo, a execução de um ensaio de densidade *in situ* que forneça a densidade da fracção $-3/4''$ complementado pelo ensaio rápido de Hilf com a fracção $-3/4''$ separada no próprio local de ensaio, pode constituir-se num critério bastante seguro para a tomada de decisões, desde que observados critérios rigorosos de preparação das amostras para evitar segregação excessiva e perdas de humidade.

6 – COMPACTAÇÃO NO CAMPO

O objectivo da execução das pistas experimentais foi a observação do desempenho do rolo vibratório liso Dynapac CK-50 na compactação do cascalho de terraço e na verificação da adequabilidade da energia de compactação de campo, arbitrada inicialmente em 6 passadas do equipamento movendo-se a 2,5 km/h sobre camadas de 20 cm de espessura. As principais características do equipamento utilizado são resumidas na Tabela V.

6.1 – Resultados obtidos

De modo geral as densidades obtidas com o equipamento vibratório liso Dynapac CK-50 situaram-se entre 2,05 e 2,20 g/cm³, independentemente da consideração de alturas de camadas ou números de passadas. As percentagens de compactação individuais são apresentadas na Fig. 9. Devido ao pequeno número de ensaios foi grande a dispersão dos resultados, como pode ser observado.

As percentagens de compactação baseadas nas densidades máximas obtidas na série 8 (Tabela A) variaram entre 92 e 104%. As “curvas de compactação” médias traçadas por esses pontos (Fig. 9-A e B) mostram um aumento contínuo de compactação para as camadas de 20 e 30 cm de espessura, alcançando cerca de 100% de compactação entre 6 e 8 passadas. As “curvas de compactação” para estas duas espessuras são muito próximas; o facto de terem sido obtidos valores de compactação um pouco superiores para a camada de 30 cm, a partir de 6 passadas, parece relacionar-se com a variação da frequência de vibrações observada entre os equipamentos do mesmo tipo utilizados.

Os ensaios de densidade das camadas de 40 cm foram executados em duas etapas obtendo-se valores de densidade das metades superior e inferior da camada. Na Fig. 9-C pode ser notado que o acréscimo de compactação com o aumento do número de passadas é muito pequeno até 8 passadas e então verifica-se um aumento brusco ao atingir-se 10 passadas. As linhas que representam a compactação das duas metades também mostram que a metade superior não tem a sua compactação aumentada a partir de 6 passadas. Um outro facto que pode ser observado é a existência duma diferença de compactação da ordem de 3% entre o topo e a base desta camada. Esta mesma diferença foi observada em alguns ensaios semelhantes executados numa das camadas de 30 cm.

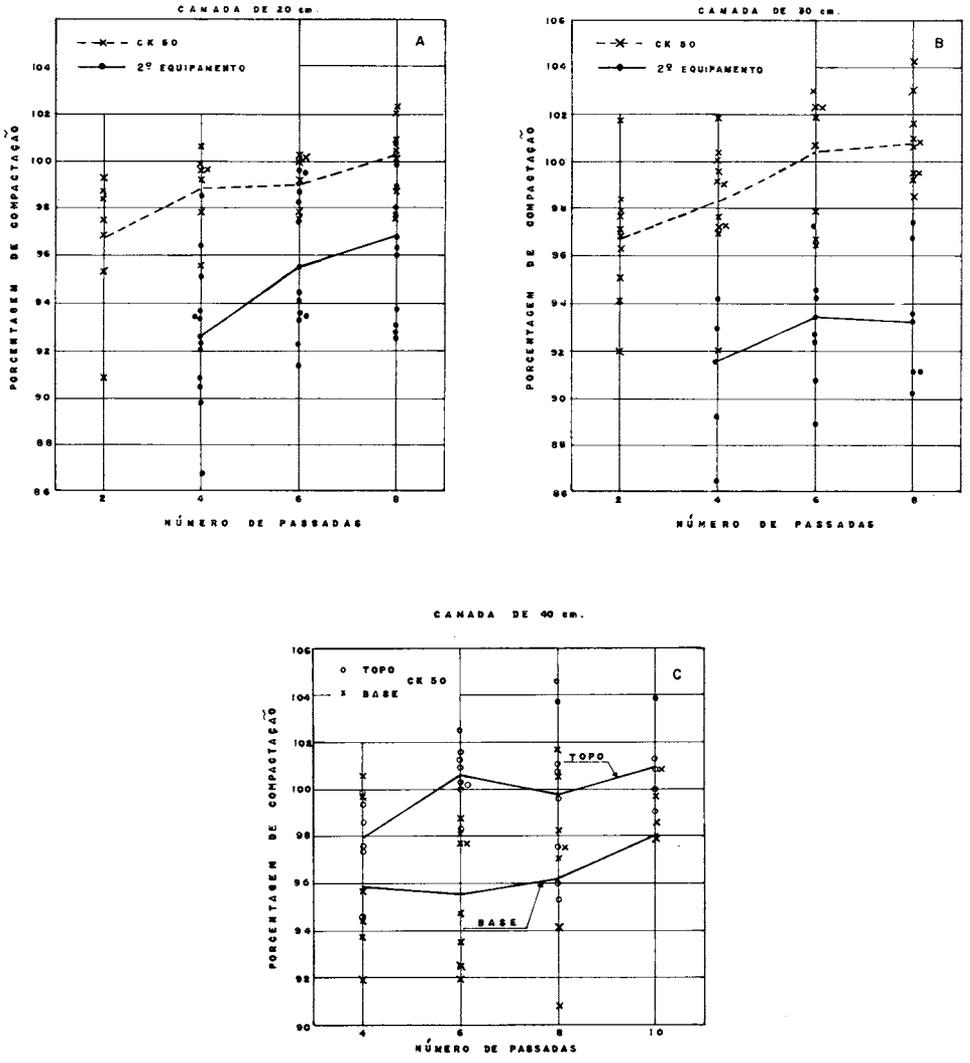


Fig. 9 – Pista experimental-percentagem de compactação em relação à “curva média”

Na Tabela IV, são apresentados os valores médios dos graus de compactação obtidos com diferentes espessuras de camadas e números de passadas deste equipamento.

TABELA IV

Altura da Camada (cm)	Porcentagem de Compactação e Número de Passadas				
	2	4	6	8	10
20	96,7	98,8	99,9	100,3	—
30	96,7	98,3	100,4	100,8	—
40	—	97,4	97,9	98,2	100,3
40 topo	—	97,9	100,6	99,8	101,0
40 base	—	95,9	95,2	96,2	98,0

Com o objectivo de confirmar os resultados obtidos nas camadas de 40 cm de espessura compactadas com o equipamento Dynapac CK-50, e de verificar qual o ganho de compactação a maiores profundidades, foi testada uma camada de cerca de um metro de espessura, compactada com 6, 10 e 14 passadas deste equipamento movendo-se a 2,5 km/h. Os ensaios de densidade *in situ* foram executados a cada 20 cm de profundidade ao longo de toda a espessura da camada, tendo-se obtido dois resultados por profundidade e por número de passadas. A cada ensaio de densidade *in situ* correspondeu um ensaio de compactação, tendo-se calculado as percentagens de compactação atingidas pelo material às várias profundidades.

Os resultados apresentados na Tabela C e na Fig. 10 mostram que a compactação é efectiva à profundidade de 40 cm já com 10 passadas, atingindo cerca de 99% de compactação em relação à energia intermediária. Com o aumento do número de passadas, elevados níveis de compactação são atingidos tanto nos primeiros 20 cm como à profundidade de 40 cm. No entanto apesar da densificação da parte superior da camada, o esforço de compactação não parece ser transmitido a maiores profundidades; observando-se a Fig. 9 verifica-se que entre 40 e 50 cm de profundidade parece haver uma descontinuidade na variação das densidades, não havendo ganho algum de compactação com o aumento do número de passadas. É possível que um ligeiro acréscimo seja obtido quando das primeiras passadas, porém o ganho de resistência do material proveniente da densificação dos primeiros 40 cm, deve impedir a transmissão da energia a maiores profundidades. Este facto porém não impede que equipamentos de compactação operando a maiores frequências de vibração, possam ser eficientes até maiores profundidades.

Com base nos dados acima discutidos, pode-se concluir que para este material não é viável a compactação de camadas com espessuras superiores a 40 cm, ao menos com o tipo de equipamento testado, mas que bons resultados

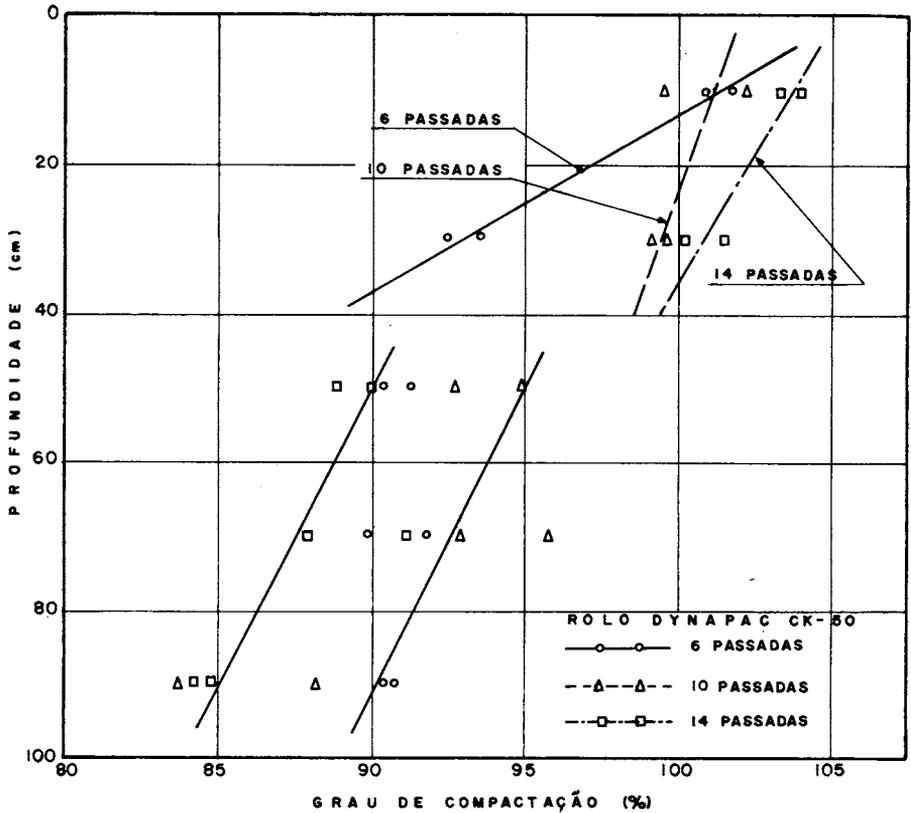


Fig. 10 – Verificação da compactação com a profundidade

podem ser obtidos, com esta espessura, desde que um número suficiente de passadas do equipamento de compactação seja especificado.

6.2 – Considerações gerais

Os valores de compactação obtidos com o rolo vibratório CK-50 atestam o bom desempenho deste equipamento ao situarem-se em torno de 98%, em relação ao nível de energia intermediário, com apenas 4 passadas sobre camadas de 20 e 30 cm de espessura. As curvas médias de compactação são muito próximas para estas duas camadas, e os resultados obtidos para as camadas de 40 cm permitem observar que a energia de compactação é efectivamente transmitida para a base da

camada após a densificação da sua parte superior, uma vez que a sua metade inferior alcança cerca de 98% ao ser submetida a 10 passadas deste equipamento.

No entanto a execução de um segundo aterro experimental com um outro equipamento do mesmo tipo mas de características um pouco diferentes (Tabela V) demonstrou que apesar do aumento do peso do equipamento de compactação, resultados inferiores foram obtidos, a diferença de compactação atingindo cerca de 3 a 4% para espessuras de camada da ordem de 20 cm, chegando a atingir 6% para as camadas com 30 cm de espessura.

A explicação para tão diferentes níveis de compactação atingidos pelo material compactado pelos dois equipamentos pode ser encontrada comparando-se as suas principais características; pode-se observar na Tabela IV que apesar de o outro equipamento ter maior impacto total que o CK-50, a sua maior largura faz com que o seu impacto por cm de geratriz seja inferior ao do CK-50 em cerca de 17%. Além deste facto tem sido observado no campo que as frequências do rolo CK-50 são maiores, o que pode explicar a aparente insuficiência do outro equipamento na compactação de camadas mais espessas, mesmo com o aumento do número de passadas.

TABELA V

Características	Equipamentos	
	CK-50	2.º equipamento
Peso	9.000 kg	12.700 kg
Diâmetro	1.520 mm	1.524 mm
Largura	2.030 mm	2.540 mm
Força centrífuga	22.000 kg	20.435 kg
Impacto total	31.000 kg	33.151 kg
Frequência	1.500 vpm	1.100-1.500 vpm
Peso p/ cm de geratriz	44,3 kg/cm	50,0 kg/cm
Impacto p/ cm de geratriz	152,7 kg/cm	130,5 kg/cm

7 – CONCLUSÕES

Dos resultados e comentários apresentados nos capítulos anteriores, os seguintes aspectos merecem maior destaque:

7.1 – Compactação em laboratório

a) A especificação de um determinado nível de energia como referência para a compactação de materiais contendo cascalho deve ser feita tendo presente o facto

de que a partir de aproximadamente 40% de cascalho, o emprego de energias superiores a um determinado nível não resulta em acréscimos significativos na densidade do material compactado. Para o material estudado este limite pode ser fixado em torno da energia fornecida pelo Proctor Intermediário (12,2 kg cm/cm³);

b) O factor de influência mais importante nas características de compactação e resistência deste material é sem dúvida a percentagem de material existente na sua fracção graúda (+ # 4). As outras características do material que dizem respeito à granulometria, tais como tamanho máximo das partículas e forma da curva granulométrica, têm importância menor face a esta característica, e só se fazem notar na medida em que a interferência entre as partículas do material atinge níveis muito elevados, como decorrência do aumento da uniformidade da fracção graúda do material;

c) Observou-se que o teor de humidade óptimo do material total varia linearmente em função da percentagem de cascalho, para todas as energias de compactação utilizadas. Para o material estudado, a um acréscimo de 10% na percentagem de cascalho corresponde um decréscimo de aproximadamente 1% na humidade óptima do material total. Com respeito à humidade da matriz que corresponde à humidade óptima do material total, observou-se que esta é crescente com a percentagem de cascalho, devendo-se este facto à redução da energia de compactação que atinge a matriz com o aumento da percentagem de partículas graúdas no material total;

7.2 – Compactação no campo

d) Bons resultados de densidade podem ser obtidos utilizando-se equipamentos do tipo vibratório liso na compactação deste material. Deve ser observado no entanto que a frequência de vibração e o impacto por centímetro de geratriz (impacto unitário), bem como a largura do tambor, são características essenciais, das quais depende, em última instância, o bom desempenho, do equipamento;

e) De modo geral com base na utilização de um equipamento de compactação adequado, este material pode ser compactado em camadas de 30 e até 40 cm de espessura, uma vez que com o aumento do número de passadas o esforço de compactação atinge, efectivamente, a base das camadas, e um nível suficiente de densidade é obtido;

f) Apesar do tamanho e da quantidade de partículas graúdas presentes no material estudado, verificou-se ser possível a execução de um controlo de compactação deste material. Tal controlo baseia-se no artifício da substituição da fracção

superior à peneira 3/4" (conforme especificado pela ASTM D-698-70) no caso de percentagens de cascalho que não excedam 40% a 45%; a partir desta percentagem, o controlo passa a ser feito com base na densidade atingida pela fracção - 3/4" do material total, em relação a um determinado nível de energia, especificado como função da energia aplicada ao material total.

8 – AGRADECIMENTO

O autor agradece à CEMIG – Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A., o apoio recebido durante a pesquisa, principalmente na construção dos equipamentos de ensaio de grandes dimensões, e à Geotécnica S.A., cuja equipa técnica integrava por ocasião da elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM – *Annual Book of ASTM Standards* – Part 11 – 1971
Basic Data Report on Test Fills of Proposed Embankment Materials for Oroville Dam Department of Water Resources of California – Novembro 1963.
- FROST, R. J. (1973) – *Some Testing Experiences and Characteristics of Boulder Gravel Fill in Earth Dams* in ASTM STP – 523, pg. 207.
- FUKUOKA, M. (1957) – *Testing of Gravelly Soils With Large Scale Apparatus* in 4th International Conference on S.M.F.E. – Londres, Vol. I pg. 153.
- GORDON, B. B. et all (1964) – *Effect of Rock Content on Compaction Characteristics of Clayey Gravel* in ASTM – STP-377, pg. 31.
- HILF, J. (1959) – *Compacting Earth Dams With Heavy Tamping Rollers* in ASCE Vol. 124 pg. 409.
- HOLTZ, W. G. e LOWITZ, C. A. (1957) – *Compaction Characteristics of Gravelly Soils* in ASTM STP-232, pg. 67.
- HUMPHRES, H. W. (1957) – *A Method for Controlling Compaction of Granular Materials* in H.R.B. Bulletin 159.
- KJAERNSLI, B. e Torblaa I. (1961) – *Compaction of Moraine in Three Feet Layers* inn 7.º Congresso de Grandes Barragens – Roma – pg. 365 R 81.
- MADUREIRA, C. J. (1975) – *Algumas características geotécnicas de materiais contendo cascalho* – Tese de Mestrado PUC – RJ.
- MINOR, L. E. e HUMPHRES, H. W. (1954) – *New Method Measuring in Place Density of Soils and Granular Materials* in H.R.B. – Bulletin – 93.
- U.S.B.R. – *Earth Manual*.

TABELA A
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

SÉRIE	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	DIÂMETRO DO MOLDE	TAMANHO MÁXIMO	PERCENTAGEM DE CASCALHO (%)	MATERIAL TOTAL		FRACÇÃO < # 4		FRACÇÃO > # 4		FRACÇÃO - # 4 CARACTERIZAÇÃO LL-IP-8-%-200-%-2µ	OBSERVAÇÕES	
					ys máx. (g/cm ³)	hot (%)	ys máx. (g/cm ³)	hot (%)	HUMIDADE	G			
1	Normal	4" 6"	# 4 3/4"	0 30 40 50 60 70	1,92	12,3	-	-	-	-	-	26-6-2,79-41-13	Resultados plotados nas figuras 26A, 27A, 29 e 30A
					2,04	10,2	1,86	14,0	Saturado	2,59			
					2,07	9,5	1,83	14,8					
					2,09	8,3	1,76	15,8					
					2,12	7,9	1,67	18,2					
					2,11	5,7	-	-					
					1,88	14,6	-	-					
2	Normal	4" 30 cm	# 4 1 1/2"	0 30 40 50 60	2,00	10,7	1,82	14,7	-	-	-	28-7-2,81-51-16	Idem 26B, 27A, 29, 30B
					2,05	9,7	1,80	15,4	Saturado	2,59			
					2,09	8,4	1,77	16,4					
					2,12	7,3	1,67	16,7					
					1,92	14,1	-	-					
					2,10	9,4	1,94	13,6					
					2,11	8,1	1,87	14,0	Seco	2,59			
3	Intermediário	4" 4"	# 4 3/4"	50 60	2,13	6,3	1,80	12,3				30-9-2,84-46-23	Idem 26A
					2,15	5,5	1,72	13,5					
					2,00	12,6	-	-					
					2,09	9,9	2,00	14,2	Saturado	2,59			
					2,11	9,0	1,88	14,9					
					2,15	7,2	1,84	14,3					
					2,19	6,1	1,78	15,2					
4	Intermediário	4" 6"	# 4 3/4"	66 70	2,20	6,6	1,68	18,0				27-7-2,86-45-20	Idem 26A, 27B, 28A, 29 e 30A
					2,19	5,8	1,62	18,6					
					1,95	14,8	-	-					
					2,10	9,1	1,93	13,9	Seco	2,59			
					2,15	8,3	1,92	13,5					
					2,16	6,6	1,86	13,3					
					2,19	5,7	1,76	13,8					
5	Intermediário	4" 6"	# 4 1 1/2"	30 40 50 60	1,95	14,8	-	-	-	-	-	30-9-2,84-46-23	Idem 26B
					2,10	9,1	1,93	13,9					
					2,15	8,3	1,92	13,5					
					2,16	6,6	1,86	13,3					
					2,19	5,7	1,76	13,8					
					1,95	14,8	-	-					
					2,10	9,1	1,93	13,9	Seco	2,59			

Continuação

SÉRIE	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	DIÂMETRO DIÂMETRO MÁXIMO	TAMANHO MÁXIMO	PERCENTAGEM DE CASCALHO (%)	MATERIAL TOTAL		FRACÇÃO < # 4		FRACÇÃO > # 4		FRACÇÃO - # 4 CARACTERIZAÇÃO LI-IP-6-%-200-%-2µ	OBSERVAÇÕES
					vs máx. (g/cm³)	hot (%)	vs máx. (g/cm³)	hot (%)	HUMIDADE	6		
6	Intermediário	4" 30 cm	# 4 1 1/2"	0	1,96	13,0	-	-	-	-	-	Resultados plotados nas figuras 26B, 27B, 28B, 29 e 30B
					2,08	9,0	1,91	12,3	Saturado	2,59		
					2,13	7,7	1,90	12,1				
					2,13	7,0	1,82	13,0				
					2,18	6,1	1,75	14,0				
					2,21	5,4	1,65	15,4				
					1,97	13,5	-	-	-	-		
7	Intermediário	4" 30 cm	# 4 3"	0	1,97	12,7	1,84	13,9	-	-	-	Idem 28C
					2,02	10,3	1,86	13,4	Saturado	2,59		
					2,09	8,4	1,83	13,0				
					2,15	6,8	1,74	13,8				
					2,18	6,0	1,65	16,0				
					2,21	5,6	-	-	-	-		
					1,97	12,7	1,92	13,9	-	-		
8	Intermediário	4" 50 cm	# 4 3"	0	2,08	10,2	1,87	13,4	-	-	-	Idem 27B e 28C
					2,11	8,4	1,84	14,1	Saturado	2,59		
					2,14	7,1	1,80	13,3				
					2,20	5,6	1,70	14,0				
					2,23	5,0	-	-	-	-		
					2,03	12,8	1,99	12,7	-	-		
					2,13	9,4	1,96	12,2	Saturado	2,59		
9	Modificado	4" 6"	# 4 3/4"	0	2,17	7,9	1,89	14,4	-	-	-	Idem 26A, 27C, 29 e 30A
					2,18	7,6	1,78	14,6				
					2,19	6,2	1,74	16,0				
					2,20	5,6	1,63	17,0				
					2,20	5,6	-	-	-	-		
					2,10	10,3	1,98	11,3	-	-		
					2,13	8,8	1,96	12,4	Saturado	2,56		
10	Modificado	4" 30 cm	# 4 1 1/2"	0	2,14	8,4	1,95	11,8	-	-	-	Idem 26B, 27C, 29 e 30B
					2,18	7,1	1,85	14,4				
					2,18	7,7	1,82	13,7				
					2,20	6,6	1,74	14,2				
					2,20	6,2	-	-	-	-		
					2,10	10,3	1,98	11,3	-	-		
					2,13	8,8	1,96	12,4	Saturado	2,56		

Continua ⇔

Continuação

SÉRIE	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	DIÂMETRO DO MOLDE	TAMANHO MÁXIMO	PERCENTAGEM DE CASCALHO (%)	MATERIAL TOTAL		FRACÇÃO < # 4		FRACÇÃO > # 4		FRACÇÃO - # 4 CARACTERIZAÇÃO LL-IP-B-%-200-%-2µ	OBSERVAÇÕES
					vs máx (g/cm ³)	hot (%)	vs máx (g/cm ³)	hot (%)	HUMIDADE	G		
11	Modificado	4" 30 cm	# 4 1 1/2"	0	1,99	13,3	—	—	—	—	30-9-2,80-55-27	Resultados plotados nas figuras 26B, 27, 29 e 30B
					2,08	10,1	1,92	13,9	Saturado	2,59		
12	Modificado	4" 30 cm	# 4 3"	65	2,17	7,4	1,87	13,5	—	—	—	
					2,20	6,2	1,73	15,8	Saturado	2,59		
13	Método Vibratório ASTM D 2049	6" 28 cm	3/4" 1 1/2"	100	2,06	10,8	—	—	—	—	—	Os valores de densidade representam o máximo e mínimo de acordo com a especificação ASTM D 2049
					2,14	8,8	1,96	12,8	Saturado	2,59		
14	Intermediário	6" 28 cm	1 1/2" 3"	100	2,16	8,3	1,85	13,0	—	—	—	Ensaio simultâneo dois a dois. Verificação da influência da saturação da Fração graúda
					2,22	7,4	1,89	14,0	Seco	2,59		
15	Intermediário	4" 30 cm	# 4 1 1/2"	100	2,24	6,6	1,88	13,6	—	—	29-7-2,82-50-16	Ensaio simultâneo três a três. Verificação da influência do tamanho máximo das partículas para iguais percentagens de cascalho
					2,23	6,2	1,78	14,2	Saturado	2,56		
15	Intermediário	4" 30 cm	# 4 3/4"	0	1,75	—	1,53	—	—	—	30-8-2,82-55-29	
					1,78	—	1,59	—	Seco	2,59		
15	Intermediário	6" 50 cm	1 1/2" 3"	100	1,85	—	1,65	—	—	—	—	
					1,91	—	1,66	—	Saturado	2,56		
15	Intermediário	6" 50 cm	1 1/2" 3"	100	2,14	7,5	1,84	14,6	—	—	—	
					2,14	7,8	1,82	14,5	Saturado	2,59		
15	Intermediário	6" 50 cm	1 1/2" 3"	100	2,11	7,6	1,79	15,0	—	—	—	
					2,10	8,9	1,78	15,0	Saturado	2,56		
15	Intermediário	4" 30 cm	# 4 3/4"	0	1,95	14,1	—	—	—	—	—	
					1,94	14,4	1,84	15,2	Seco	2,59		
15	Intermediário	6" 50 cm	1 1/2" 3"	100	2,09	9,4	1,86	14,8	—	—	—	
					2,09	8,9	1,86	14,5	Saturado	2,56		
15	Intermediário	6" 50 cm	1 1/2" 3"	100	2,09	9,1	1,86	14,5	—	—	—	
					2,12	8,2	1,80	17,5	Saturado	2,56		
15	Intermediário	6" 50 cm	1 1/2" 3"	100	2,14	7,4	1,82	14,8	—	—	—	
					2,14	7,6	1,82	15,2	Saturado	2,56		
15	Intermediário	6" 50 cm	1 1/2" 3"	100	2,15	6,9	1,94	16,5	—	—	—	
					2,16	6,0	1,95	15,0	Saturado	2,56		
15	Intermediário	6" 50 cm	1 1/2" 3"	100	2,18	5,0	1,98	14,8	—	—	—	
					2,18	5,0	1,98	14,8	Saturado	2,56		

Continua ⇄

Continuação

SÉRIE	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	DIÂMETRO DO MOLDE	TAMANHO MÁXIMO	PERCENTAGEM DE CASCALHO (%)	MATERIAL TOTAL		FRACÇÃO < # 4		FRACÇÃO > # 4		FRACÇÃO - # 4 CARACTERIZAÇÃO LL-IP-S-%-200-%-2µ	OBSERVAÇÕES
					vs máx. (g/cm ³)	hot (%)	vs máx. (g/cm ³)	hot (%)	HUMIDADE	G		
16	Intermediário	6"	3/4"	40	2,10	9,5	1,86	15,8	Seco	2,59	31-9-2,80-48-26	Ensaio simultâneos dois a dois. Verificação da influência do tamanho do molde de compactação
		30 cm	3/4"	40	2,08	8,8	1,85	14,9				
		30 cm	1 1/2"	50	2,12	7,8	1,78	15,7			31-8-2,86-48-25	
		50 cm	1 1/2"	50	2,12	7,8	1,80	15,6			30-8-2,80-45-25	
		6"	3/4"	50	2,12	8,0	1,80	16,0				
		30 cm	3/4"	50	2,09	7,8	1,75	15,6			52-9-2,82-54-27	
17	Intermediário	30 cm	1 1/2"	60	2,15	6,3	1,71	15,4			Curva inferior	Ensaio simultâneos dois a dois. Influência da forma da curva granulométrica
		50 cm	1 1/2"	60	2,13	6,5	1,68	15,4			Curva superior	
		30 cm	1 1/2"	50	2,18	7,8	1,89	15,6	Seco	2,59	Curva inferior	
		30 cm	1 1/2"	50	2,18	7,4	1,88	15,2			Curva superior	
		30 cm	1 1/2"	60	2,17	5,8	1,76	14,0			Curva inferior	
		50 cm	1 1/2"	60	2,16	6,3	1,74	15,8			Curva inferior	
18	Intermediário	4"	3/4"	30	2,08	10,2						Ensaio simultâneos dois a dois. Verificação do tamanho de Molde Adequado
		6"		30	2,10	9,6						
		4"		40	2,11	8,1						
		6"		40	2,13	8,6						
		4"		50	2,14	7,2						
		6"		50	2,18	7,0						
19	Intermediário	6"	1 1/2"	30	2,07	10,0	1,91	15,0	Seco	2,59		Ensaio simultâneos dois a dois. Verificação do tamanho de Molde Adequado
		30 cm		30	2,07	9,8	1,91	13,8				
		6"		50	2,15	7,9	1,83	15,8				
		30 cm		50	2,15	7,7	1,82	15,4				
		6"		70	2,17	8,8	1,80	19,2				
		30 cm		70	2,19	5,5	1,60	19,4				

