

# Fundação Sobre Atêrro Compactado

*Eng. Milton Vargas*

Conferência realizada no auditório do D.N.E.R., Rio de Janeiro,  
em reunião da A.B.M.S. — janeiro de 1951

Há bem pouco tempo, no mundo inteiro, a construção de um atêrro resumia-se no transporte de terras das jazidas e seu simples lançamento na área a aterrar. A porosidade média do solo, nessa operação, era muito aumentada, sua resistência grandemente diminuída e o solo perdia, ainda, grande parte da sua natural resistência à erosão. Nas estradas e nos pátios esperava-se recalques até que, anos depois, se pudesse contar com a estabilização. Nas estradas de ferro os recalques eram compensados com o aumento do lastro, nas estradas de rodagem a falta de pavimento impedia que os abatimentos do leito fossem notados ou o pavimento flexível usado acomodava-se a êles. Quanto às fundações, a regra era: nada construir sôbre atêrro.

O aumento da velocidade dos veículos trouxe, porém, a necessidade de pavimentos rígidos nas estradas e êstes a necessidade de compactação. Alguns desastres ferroviários produzidos pela passagem de trens rápidos e pesados sôbre aterros mal compactados ame-drontaram os ferroviários. O progresso rápido da aeronáutica exigiu construção rápida de pistas capazes de resistirem a grandes cargas por roda dos aviões. Daí a necessidade de bases muito bem compactadas nos aeroportos.

Essas necessidades deram nascença aos estudos que levaram a desenvolver não só a técnica de compactação dos atêrros como, também, o contrôle de laboratório do processo. Paralelamente vem-se desenvolvendo uma teoria completa do fenômeno a qual acelera, por sua vez, não só o entendimento do fato como o progresso dos métodos de execução e do equipamento, tornando a compactação dos solos uma operação cada vez mais eficiente, mais conveniente e mais econômica.

Esse progresso veio possibilitar a construção de pavimentos rígidos sôbre atêrros recém-construídos sem perigo de quebra dos mesmos por efeito de recalques. Veio possibilitar a construção de pistas de aeroportos capazes de suportar cargas até 100 t por roda e espera-se ir além. E veio trazer aos construtores a possibilidade de edificar sôbre aterros tão sólida e estavelmente quanto sôbre solo natural resistente.

Pretende-se aquí descrever os métodos e resultados obtidos na construção das fundações de um grande reservatório d'água — o Reservatório da Consolação — com capacidade de cêrca de 50 000 000 de litros, projetado pela Repartição de Águas e Esgotos de São Paulo e construído pela Sociedade Construtora Brasileira Ltda. e que faz

parte do plano de ampliação da rede de distribuição d'água de São Paulo. Tal reservatório, devido a uma série de circunstâncias teve de ser fundado sobre atêrro compacto.

*O solo de São Paulo* — A cidade de São Paulo está fundada sobre uma série de camadas, provavelmente pliocênicas, de fácies de deposição extremamente variáveis, dominando entretanto o sub-aéreo. As côres vermelhadas dominantes e a falta de fósseis acusam um clima inclemente nessa época; elas enchem uma espécie de bacia na rocha primitiva. As camadas mais próximas do embasamento cristalino que atingem a cota 730, aproximadamente, são de areias médias ou grossas, de compacidades médias e saturadas d'água. Sobre essas camadas repousam cerca de dez metros de camadas alternadas de argilas, argilas arenosas e areias finas, com lentes de areia grossa, de deposição errática e muitas vêzes variando a textura não só em profundidade como em extensão. A consistência dessas argilas é dura ou rija-plástica e a das argilas arenosas varia de mole a rija. As areias finas, em geral, têm compacidade média. Acima dessas camadas, aparece uma espessa camada de argila que capeia as formações paulistanas. Essa argila é amarelada e dura na sua base e apresenta uma côr vermelha carregada no seu tópo. Os espigões da cidade de São Paulo mostram essa terra vermelha, extremamente po-

### RESERVATÓRIO DA CONSOLAÇÃO PERFIL DO TERRENO

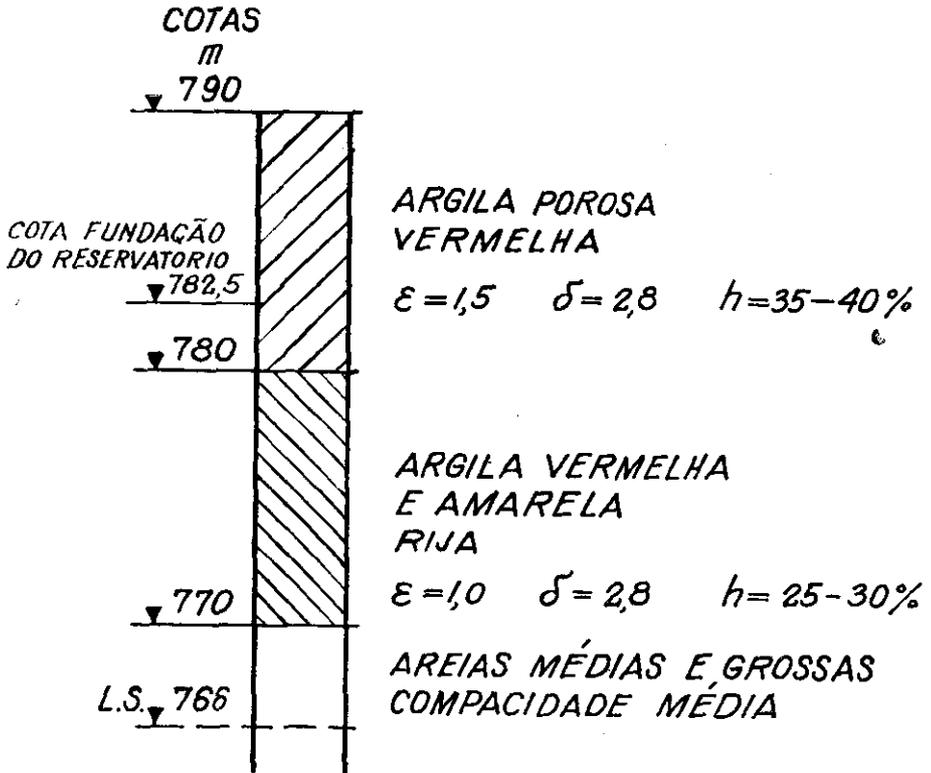


Fig. 1

rosa e compressível. Provavelmente essa camada vermelha é um evolução, sob a ação de agentes climáticos da argila dura amarela. A transição entre as duas é gradual não havendo superfície alguma que mostre diferença de deposição. Pode ter acontecido que parte da matéria coloidal da argila tenha-se precipitado lixiviando a parte superior da camada e aumentando a densidade da inferior. A figura 1 mostra o perfil médio do terreno no local do Reservatório d'Água do bairro da Consolação. Verifica-se a existência, nêsse local, de uma espessa capa de argila porosa.

Essa argila vermelha porosa tem sido tradicionalmente um problema de fundação em São Paulo. A construção de edifícios sôbre a mesma, mesmo com taxas reduzidas nas sapatas tem resultado em recalques que na maioria das vêzes são suficientemente grandes para trincar as alvenarias de tijolos.

A figura 2 mostra um gráfico de plasticidade onde estão colocados pontos correspondentes aos limites de liquidez e índice de plasticidade tanto da argila vermelha e amarela rija como da argila porosa vermelha que ocorrem no local do Reservatório da Consolação.

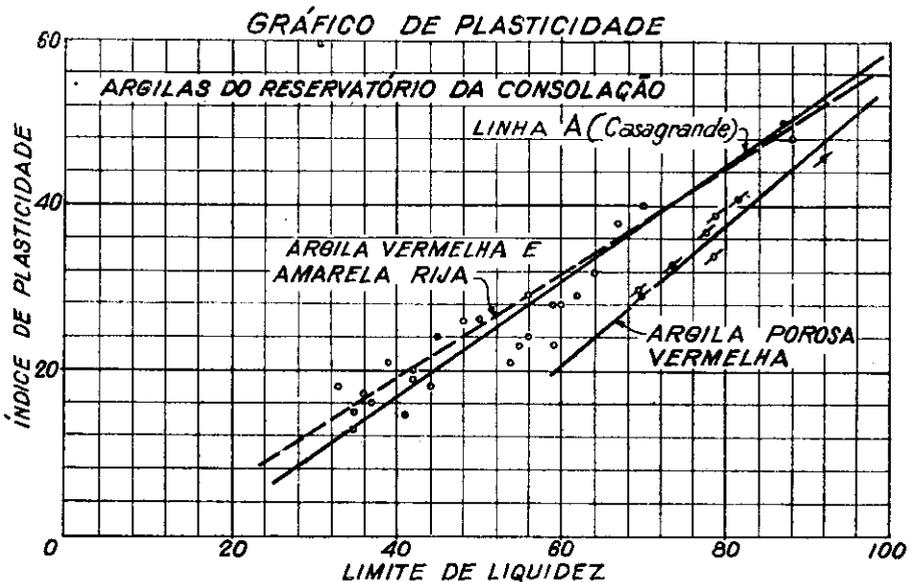


Fig. 2

**A compactação dos solos** — Os solos são constituídos, como é notório, por grãos minerais e, às vêzes, matéria orgânica, envolvidos por água. Muitas vêzes entre os grãos existe, ainda, poros cheios de ar. Os grãos de solo em geral têm diâmetros diferentes variando de poucas "micra", nas argilas, a poucos milímetros, nas areias. Um solo pode ter uma distribuição granulométrica uniforme, isto é, ter todos os seus grãos praticamente do mesmo diâmetro ou ser composto de grãos cujos diâmetros são extremamente variáveis. No primeiro caso estão as areias de praia de granulação uniforme e, no segundo, a grande maioria dos solos argilosos.

Esses grãos dos solos podem estar arranjados de forma fôfa, isto é, na forma em que os espaços entre os grãos sejam relativamente grandes, ou de forma densa, isto é, na em que os espaços entre os grãos sejam pequenos. Para medir o estado de compacidade dos solos usa-se o "índice-de-vazios" do mesmo que é definido como a relação

$\epsilon = \frac{V_v}{V_s}$  onde  $V_v$  é o volume dos vazios entre os grãos e  $V_s$  o volume ocupado pelos grãos, dentro de um certo volume total.

Quando o solo não é de distribuição granulométrica uniforme, porém, contém grãos de diâmetros muito variados os arranjos possíveis dos grãos são muitos. Haverá, porém, sempre um arranjo correspondente a  $\epsilon_{máx.}$  e outro correspondente a  $\epsilon_{mín.}$  :são os estados mais fôfo e mais compacto possíveis. O grau de compacidade de um solo qualquer com um índice de vazios qualquer  $\epsilon$  é então, definido

pela relação:  $D = \frac{\epsilon_{máx.} - \epsilon}{\epsilon_{máx.} - \epsilon_{mín.}}$ . E' costume dizer que para  $D > 1/3$  o

solo é fôfo, entre  $1/3$  e  $2/3$  o solo é medianamente compacto e para  $D > 2/3$  o solo é compacto. Entretanto tal tentativa de classificação de compacidade dos solos está longe, ainda, de uma aceitação universal e é mesmo, sujeita à contestação por meios experimentais.

Se fôssemos calcular qual seria a massa específica aparente  $\gamma$  de uma certa quantidade de solo a partir do conhecimento: 1) — da massa específica dos grãos  $\delta$ , que supomos a mesma em toda a massa; 2) — do seu grau de saturação  $S = \frac{V_{ag}}{V_v}$ ; 3) — da umidade do solo, isto é, do pêso de água  $P_a$  existente numa massa de solo cujo pêso total dos grãos seja  $P_s$ ,  $h = P_a/P_s$ , chegaríamos à expressão:

$$\gamma = \frac{(1 + h)}{1/\delta + S h}$$

Ná prática para contrôle de compactação, utiliza-se a chamada "massa específica aparente sêca":

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{1 + h} = \frac{1}{1/\delta + h}$$

Quando o solo é saturado, isto é, quando todos os seus poros estão cheios d'água, e não há ar na massa, tem-se:  $S = 1$ . Então:

$$\gamma_s = \frac{1}{1/\delta + h}$$

Por essa última fórmula verifica-se que a relação que liga  $\gamma_s$  a  $h$  (quando  $\delta$  é constante) é uma hipórbole chamada de "curva de saturação".

Mantendo-se um solo saturado porém, variando seu estado de compactação, sua umidade e massa específica aparente variarão acompanhando a curva de saturação. Como já vimos haverá dois pontos limites, os correspondentes ao máximo e ao mínimo índices de vazios os quais corresponderão evidentemente à dois pontos da curva de saturação, isto é, aos pontos de massas específicas máximas e mínima  $\gamma_{máx.}$  (estado mais compacto possível) e  $\gamma_{mín.}$  (estado mais sôlto possível).

Observando as expressões acima apresentadas e interpretando-as de acordo com a curva de saturação verifica-se que, num determinado solo, todos os estados possíveis de compactação devem ser definidos por pares de valores  $\gamma_s$  e  $h$  que caem abaixo da curva de saturação e entre as massas específicas máximas e mínima. Ao variar a compactação de forma a manter constante  $\gamma_s$ ,  $h$  variará com a densidade aparente  $\gamma_a$  ao longo de uma reta paralela a  $h$ . O valor do índice de vazios manter-se-á constante nessa variação, porém, o chamado grau de saturação, isto é,  $S = \frac{V_a}{V_v}$  a relação entre o volume de água e o volume dos poros variará de 0 no eixo dos  $\gamma_s$  até 1, na curva de saturação. Assim é possível traçar curvas de grau de saturação constante como mostra a figura 3.

### ARGILA POROSA VERMELHA DA CONSOLAÇÃO CURVAS DE COMPACTAÇÃO

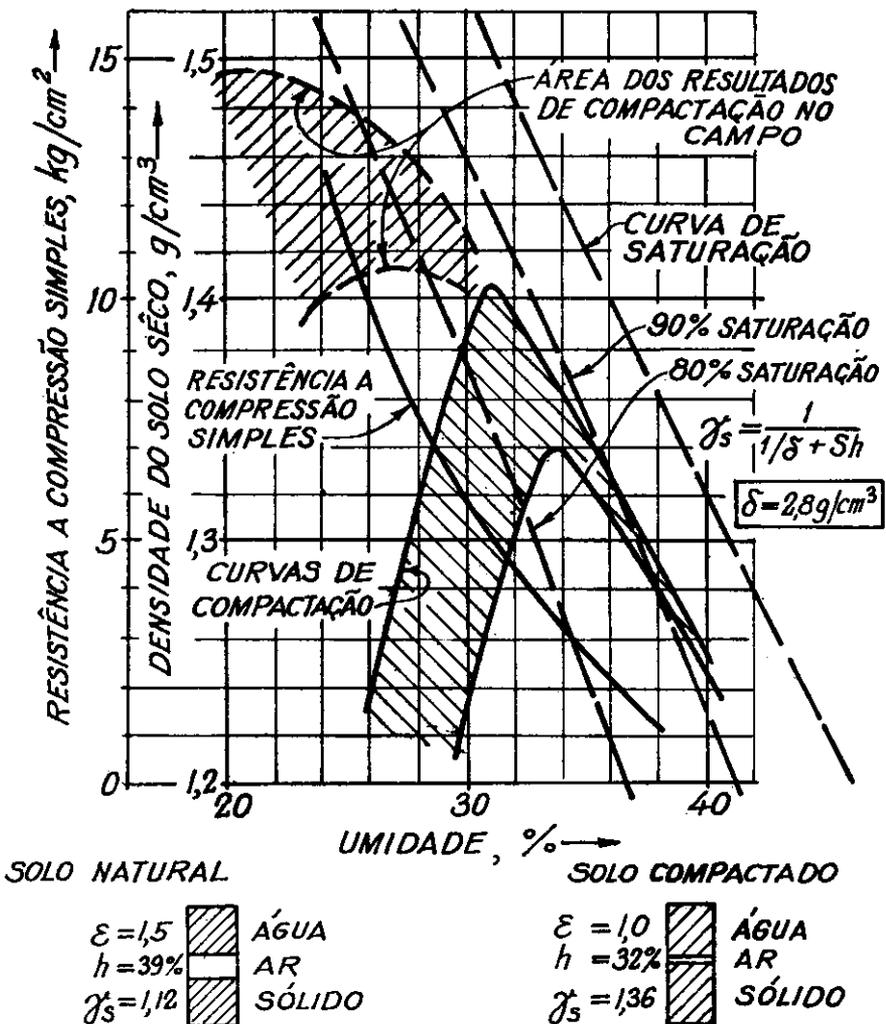


Fig. 3

Para se determinar as características de compactação de um solo argiloso ou pouco argiloso utiliza-se o chamado ensaio de Proctor ou ensaio de compactação, já padronizado pela A.B.N.T.. Pelo método da A.B.N.T. compacta-se o solo num recipiente cilíndrico de cerca de 10 cm de diâmetro e com a capacidade de 1 litro, em três camadas sucessivas, sob a ação de 25 golpes com soquete de 2,5 kg caindo de 30 cm de altura. O ensaio é repetido sob diferentes umidades e obtém-se densidades aparentes secas, diferentes para cada umidade, que se dispõem numa curva que é ascendente para umidades baixas, atinge um máximo numa umidade que é chamada "ótima", e, daí por diante, é descendente. Curvas semelhantes a essa são obtidas quando se aplicam métodos diferentes ou mesmo quando se medem as massas específicas obtidas no campo com maquinaria de compactação. A figura 3 mostra curvas desse tipo.

Essa curva evidencia, então, que durante as compactações só se obtém saturação do material acima daquela umidade chamada a umidade ótima de compactação. A partir dessa umidade a curva obtida nos ensaios segue próxima à curva teórica de saturação. Antes porém, da umidade ótima, os atritos entre os grãos são de tal forma que não se consegue diminuir os vazios de forma a obter-se saturação e as massas específicas obtidas são sempre menores que à correspondente ao ponto de umidade ótima. A experiência tem mostrado ainda que em torno desse ponto a eficiência da compactação por meio de maquinaria moderna é máxima. Abaixo dessa umidade o solo sendo excessivamente seco resiste ao esforço de compactação não havendo, por exemplo, penetração dos pé-de-carneiro, dos rolos compressores desse tipo, e acima, sendo a umidade excessiva, refluí o solo sem se deixar compactar, atolando, mesmo, os rolos compressores. A figura 3 mostra, em hachurado a zona dentro da qual caíram as curvas de compactação obtidas em ensaios normais de Proctor sobre amostras do solo argiloso poroso vermelho da fundação do Reservatório da Consolação.

Há, portanto, uma umidade ótima para compactação à qual corresponde uma massa específica aparente seca máxima. Esse par de valores  $h_{ot}$  e  $\gamma_s_{máx.}$  depende entretanto do esforço de compactação. O padronizado pela ABNT corresponde aproximadamente ao conseguido com cerca de 10 passadas de um rolo compressor pé-de-carneiro do tipo comum de 2,5 t, compactando camadas de cerca de 15 cm de espessura. Modernamente entretanto a utilização de rolos compressores gigantes tem reclamado ensaios de laboratório cujos esforços de compactação sejam maiores. Assim o ensaio A.A.S.H.O., modificado pelo "U.S. Corps of Engineers adota um soquete de 5 kg caindo de 45 cm de altura e cinco camadas em vez de três. Ao variar o esforço de compactação o ponto correspondente ao par de valores  $\gamma_s_{máx.}$ ,  $h_{ot}$  deslaca-se ao longo da curva de saturação; ao crescer o esforço compactador  $\gamma_s_{máx.}$  cresce e  $h_{ot}$  diminui. A curva de compactação, porém, sempre mantém o mesmo aspecto. Na figura 3 está indicada ainda a zona onde caíram os pontos umidade-densidade verificados

no solo, após compactação da argila porosa vermelha, por meio de rôlo compressor pé-de-carneiro. Observa-se que a densidade máxima obtida no campo é superior à de laboratório e que a umidade ótima para obter tal densidade é inferior à indicada pelo ensaio.

Qualquer característica ligada à resistência ao cisalhamento dos solos compactados: resistência à compressão simples de cilindros de solo compactado, resistência à penetração de uma agulha no solo compactado, resistência ao puncionamento por um cilindro rígido, etc., decresce com o crescer da umidade do solo. Na figura 3 aparece uma curva de resistência à compressão simples dos próprios corpos de prova moldados nos ensaios de compactação em correlação com a curva destes ensaios.

Quanto mais secos são os corpos de prova mais bruscas são as rupturas; quanto mais úmidos, maiores são as deformações de ruptura. Passam assim os corpos de prova de um comportamento de material friável para o de material plástico.

Se, entretanto, saturarmos os corpos de prova antes de rompê-los a compressão simples a variação de sua resistência não será como a indicada na curva da figura 3. Haverá uma perda de resistência para tôdas as umidades abaixo da ótima, tanto maior quanto menor fôr a umidade inicial. Da umidade ótima para cima, os corpos de prova já estarão saturados, como foi visto, e não haverá perda de resistência com uma tentativa de saturação. Daí a grande vantagem da compactação dos aterros ser feitas na umidade ótima, pois, êsse ponto é o de maior resistência à compressão simples que não sofre variação de resistência por saturação posterior à compactação.

*A compactação* — A base do reservatório deveria ficar, devido a exigências da rêde, em cota tal que a superfície inferior das sapatas de fundação dos muros iriam repousar sôbre a cota 782,5 (vide figura 1). Ora, nessa cota existia, ainda, cêrca de 2,5 m de espessura de camada de argila porosa vermelha muito compressível. Resolveu-se, então, escavar a argila poroso ao longo das sapatas contínuas dos muros laterais do reservatório (cujas dimensões externas eram de cêrca de 100 x 75 m e de altura correspondente a cêrca de 7 m de altura d'água) e recompô-lo por meio de compactação afim-de reduzir seus vazios e, conseqüentemente, sua compressibilidade.

Primeiramente, a camada de argila porosa que ficaria entre a base das fundações e a camada de argila dura foi amostrada e submetida a ensaios de compactação. O solo mostrou-se, pelo menos, no que concerne à compactação, perfeitamente uniforme. A figura 3 mostra a curva média de compactação desse material. Entretanto, para uma melhor determinação, não só dessas características, como também, do número de passadas necessárias do rôlo compressor foi compactado um trecho experimental. Como equipamento de compactação foi escolhido um rôlo compressor pé-de-carneiro pesando 3 t e o solo foi lançado numa camada de 20 cm de espessura. Mediram-se as massas específicas aparentes obtidas à medida que o número de passadas ía aumentando. A umidade do solo foi mantida

durante toda a operação tão próxima do ponto ótimo, determinado nos ensaios, quanto possível. Foi depois armado sobre o rolo compressor um contrapêso de concreto armado para aumentar-lhe o pêso, o qual atingiu 5 t. A figura 4 mostra as curvas de densidade sêcas em função do número de passadas, assim obtidas. Foi admitido, a partir dessas curvas, que vinte seria um número suficiente de passadas, para o compressor com contrapêso, enquanto que o compressor comum necessitaria de quarenta passadas para produzir o mesmo efeito.

### VARIAÇÃO DA DENSIDADE COM O NÚMERO DE PASSADAS DO PÉ-DE-CARNEIRO RESERVATÓRIO DA CONSOLAÇÃO

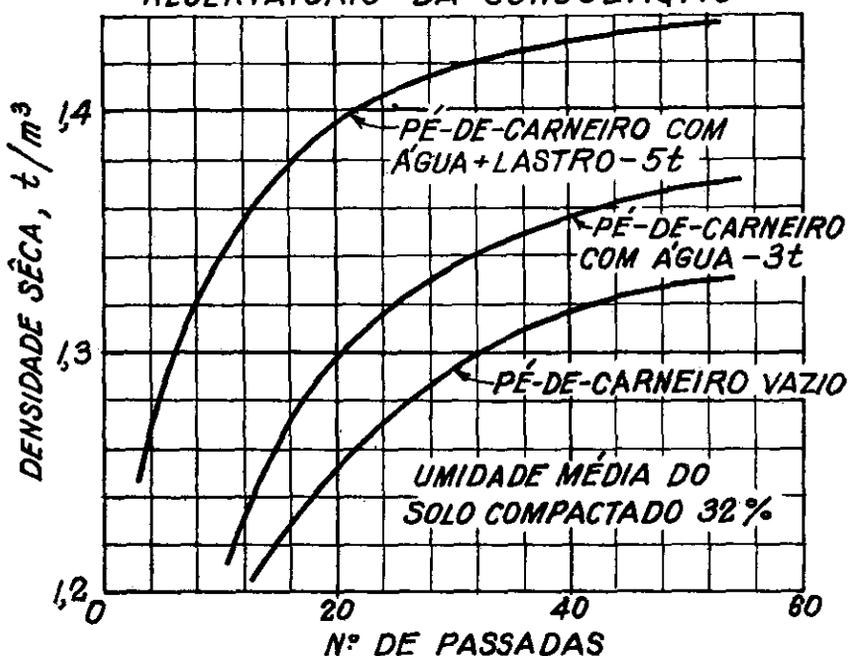


Fig. 4

Com base nessas experiências foi organizado o serviço de compactação da seguinte forma: a área da fundação foi dividida em vários trechos os quais eram escavados sucessivamente até a superfície da argila dura, a terra escavada era primeiramente amontoada nas áreas dos trechos ainda não abertos e depois redepositada na faixa escavada em camadas sucessivas de 20 cm de espessura, cada qual sendo compactada com 20 ou 40 passadas dos rolos compressores pé-de-carneiro, até que se atingisse a cota da base das sapatas. Durante toda a operação de compactação ficava na obra um laboratorista do I.P.T. cuja função era determinar a umidade para verificar se era mantida próxima da umidade ótima de compactação e determinar a massa específica aparente obtida. Quando a umidade diferia sensivelmente da ótima, a obra era suspensa e, ou esperava-se secar o solo ou se o umidecia até atingir aquela umidade. Quando

a massa específica não atingia, pelo menos, 90% da determinada em laboratório, a camada em compactação era removida e recompactada. Assim conseguiu-se que todo o aterro atingisse uma massa específica média de 93% da média das máximas obtidas nos ensaios de Proctor.

**RESERVATÓRIO DA CONSOLAÇÃO**  
**PROVAS DE CARGA DIRETAS**  
**PLACA DE  $\phi$  80cm**

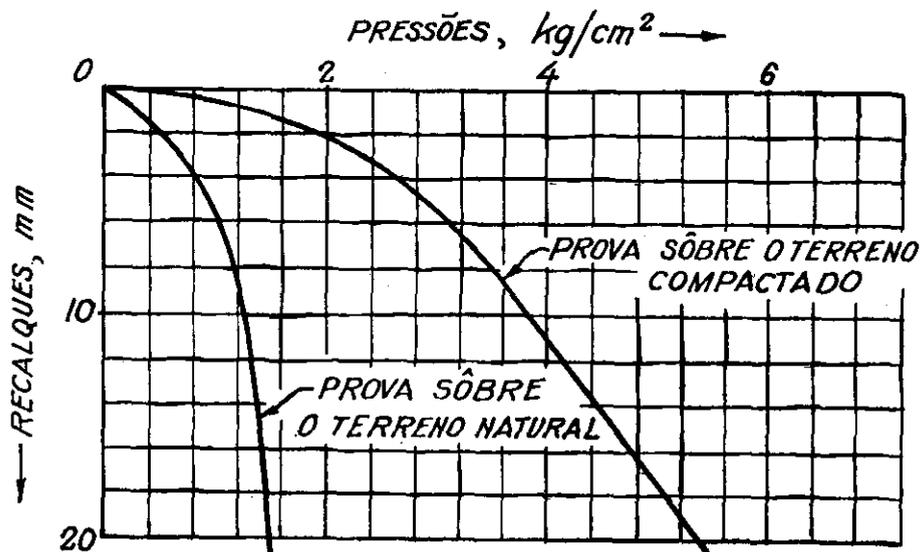
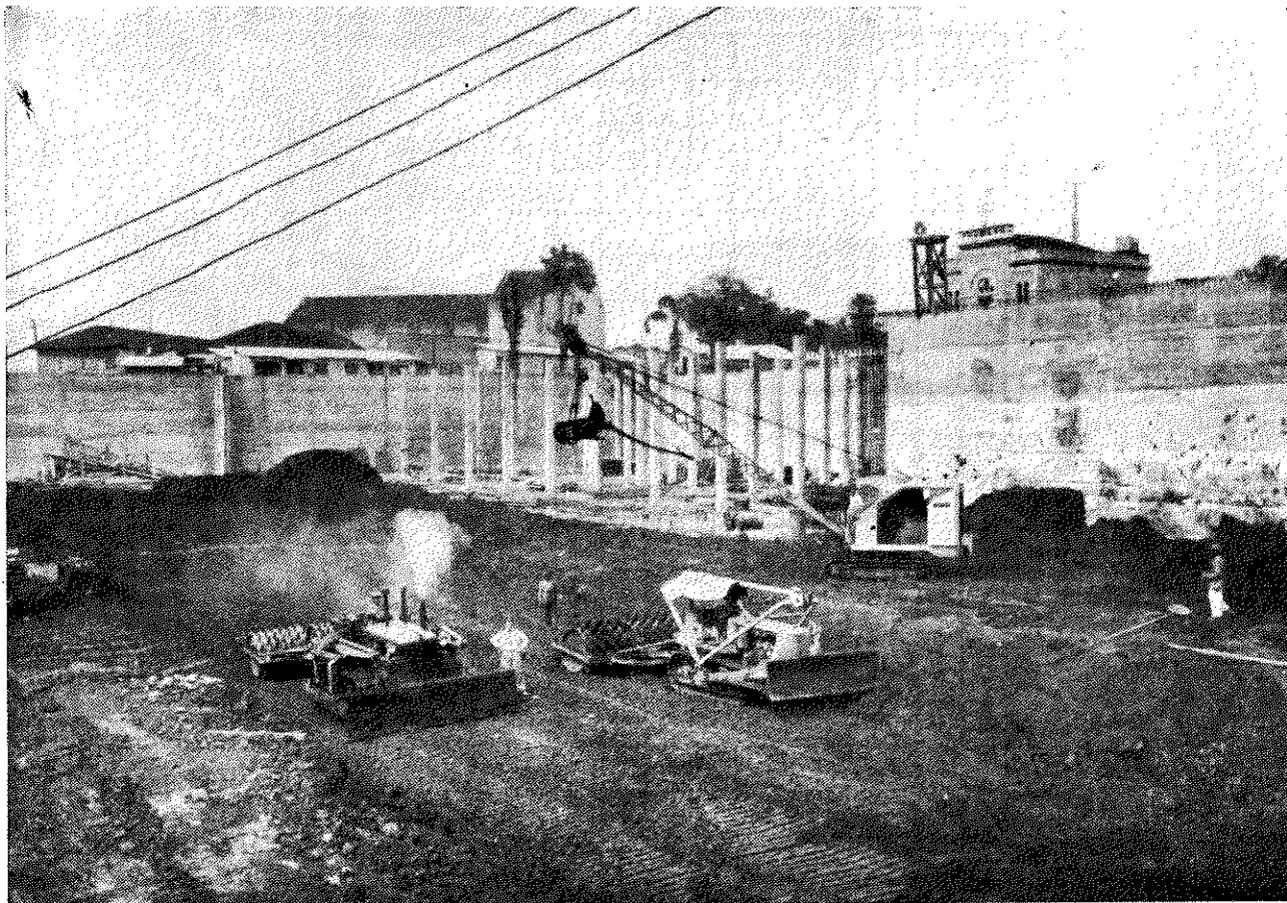


Fig. 5

Para se ter uma idéia da melhoria das condições de capacidade de carga do solo natural e compactado, a figura 5 mostra as curvas pressão — recalque obtidas em provas de carga diretas sôbre o terreno natural e o compactado. Por meio dessa figura verifica-se que a carga de ruptura do terreno natural era de 1,6kg/cm<sup>2</sup>, a pressão admissível nas sapatas sendo, então, da orde mde 0,8 kgcm/². Com a compactação pode-se admitir cêrca de 2,5 kg/cm<sup>2</sup> pois a prova de carga foi levada até cêrca de 5,5 kg/cm<sup>2</sup> sem se observar ruptura.

Na figura 6 é apresentada uma fotografia da obra com o serviço de compactação já praticamente terminado. Nessa fotografia vê-se a escavadeira utilizada para abrir as valas ao longo das sapatas das perêdes do reservatório; ao fundo vêem-se as parêdes externas já concluídas e algumas colunas que irão suportar o teto. Essas últimas (como suportassem cargas pequenas) foram fundadas por blocos assentes diretamente na argila rija. No centro da fotografia aparecem os dois compressores pé-de-carneiro utilizados na compactação. Eles estão terminando a compactação de uma faixa onde repousará a sapata de uma parêde central do reservatório.



*Fig. 6*