



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

**SOLO-CIMENTO PARA
REVESTIMENTO DE BARRAGENS DE TERRA,
DIQUES E RESERVATÓRIOS**

por

*Márcio Rocha Pitta
Engenheiro Civil*

São Paulo
setembro de 2000

1ª edição - 1980
2ª edição - 1983
3ª edição - 1989
4ª edição - 2000

PITTA, M.R.

Solo-cimento para revestimento de barragens de terra,
diques e reservatórios. 4.ed. São Paulo,
Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.
20p. (ET-34)

ISBN 85-87024-34-5

Barragens: Revestimento de solo-cimento
Canais: Revestimento de solo-cimento
Solo-cimento: Dosagem
Solos: Estabilização

CDD 625.89

Todos os direitos reservados à
Associação Brasileira de Cimento Portland
Avenida Torres de Oliveira, 76 - Jaguaré
CEP 05347-902 São Paulo/SP
Tel.: (11) 3760-5300 - Fax: (11) 3760-5370

PITTA, Márcio Rocha. *Solo-cimento para revestimento de barragens de terra, diques e reservatórios*. 4.ed.rev.atual. São Paulo, ABCP, 2000. 20p. (ET-34).

Tem aumentado em nosso País, desde algum tempo, a necessidade vital de incrementar a disponibilidade de recursos hídricos, seja para uso na irrigação de áreas cultiváveis, seja para consumo ou, ainda, para a geração de energia elétrica. Como em todo empreendimento, o aspecto econômico sobressai, e é essencial garantir a esses investimentos — barragens, canais, diques e reservatórios — uma durabilidade adequada, que venha a diluir os custos de construção da instalação projetada. Uma prática que, por diminuir enormemente a erosão causada pela água e pelos agentes externos (como as intempéries), é muito conveniente para a necessária proteção da superfície exposta, é o seu revestimento com solo-cimento — concebido, dosado e executado de modo a proporcionar baixo custo inicial, simplicidade de construção, pouca necessidade de manutenção e longa vida de serviço, gerando uma solução prática e econômica, que, além do mais, evita o emprego às vezes devastador, predatório de jazidas de material pétreo, e que vem sendo adotada com sucesso nos EUA^(), no Canadá, na Argentina e em diversos outros países — inclusive no Brasil, em que sobressaem os experimentos pioneiros dos diques do Moju, na área de Tucuruí (PA), e de Rosana (SP).*

Esta publicação expõe sucintamente as técnicas de projeto, dimensionamento e dosagem de solo-cimento no campo mencionado, introduzindo algumas alterações que visam ajustá-las à nossa própria tecnologia do material e às condições peculiares do meio técnico brasileiro.

As informações aqui contidas devem ser tomadas, por pessoal técnico qualificado, dentro da significância e limitações estritas delas.

(*) Desde a pioneira *Bonny Dam* (Colorado, EUA, 1952), mais de 60 barragens de terra tiveram seus montantes protegidos com solo-cimento, nos EUA, de 1961 até 1973, além de um sem número de aplicações similares (ver Ref. 3).

Palavras-chave: Barragens - Revestimento de solo-cimento; Canais - Revestimento de solo-cimento; Solo-cimento - Dosagem; Solos - Estabilização.

SUMÁRIO

RESUMO

1 PROJETO DO REVESTIMENTO 7

2 DOSAGEM DE SOLO-CIMENTO 15

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 19

1 PROJETO DO REVESTIMENTO

O emprego de solo-cimento como revestimento ou proteção do paramento de montante de uma barragem de terra, de um dique ou de um reservatório não implica modificações nas condicionantes técnicas de projeto dessas estruturas; é pacífico, no entanto, que a impermeabilidade, a resistência aos esforços mecânicos, a coesão e a baixa erodibilidade do solo-cimento acrescentam palpável melhoria na estabilidade do terrapleno.

A experiência mostra, ao mesmo tempo, que o revestimento de solo-cimento pode ser afetado por duas ocorrências: o afundamento de peças contíguas (separadas pela trinca de retração), causado pelo recalque excessivo do aterro, e a ruptura provocada pela pressão hidrostática proveniente da infiltração demasiadamente rápida da água no maciço. No primeiro caso, a análise estrutural da mesma, efetuada pelo projetista, elimina o fato no nascedouro, posto que delimita e restringe previamente as suas causas: fundação muito compressível ou aterro por demais adensável. É claro que, na ocorrência de uma ou outra das causas, pode-se prever o comportamento futuro do conjunto estrutura-revestimento, pela interação das características físico-mecânicas das duas unidades^(*). A *Portland Cement Association (PCA)*, dos EUA, recomenda como boa prática retardar convenientemente a aplicação do revestimento, nos casos em que se conheça previamente a taxa de adensamento do maciço¹ (**).

No caso da infiltração muito rápida da água através da barragem (4 m ou 5 m em uns poucos dias), a saturação do solo pode originar altas pressões hidrostáticas, que agiriam contra a face interna do revestimento. Há técnicas de projeto que podem, facilmente, eliminar o fenômeno. Foram utilizadas em casos como os das barragens *MERRIT* (Nebraska), *CHENEY* (Kansas), *STARVATION* (Utah) e *UTE* (New Mexico). Por exemplo, pode-se projetar e executar o aterro de modo a

(*) Além do mais, medidas tomadas em diversas barragens mostram que, apesar da ocorrência de valores grandes de recalque da estrutura, os revestimentos de solo-cimento têm se comportado muito bem, e não se notam neles recalques significativos (ver Ref. 1 e Ref. 2).

(**) Os números pequenos sobrescritos dessa forma remetem à Referência Bibliográfica.

colocar os materiais mais impermeáveis imediatamente sob o revestimento de solo-cimento, o que evita que a quantidade de água ocasionalmente infiltrada pelas fissuras seja suficiente para gerar pressões muito elevadas. Deve-se frisar, também, que os painéis de solo-cimento porventura formados pelas fissuras de retração têm dimensões e massa muito grande, exigindo para sua movimentação um espantoso esforço hidrostático; admite-se, entretanto, que o custo de medidas contra o evento é, em geral, vultoso, daí justificando-se seu emprego apenas em casos críticos.

O projeto do revestimento de solo-cimento para barragens, diques e reservatórios prende-se à determinação das variáveis seguintes:

- *espessura da camada horizontal acabada (v);*
- *largura da camada horizontal (ω);*
- *espessura mínima do revestimento, medida perpendicularmente ao talude (t_n);*
- *inclinação do talude (1:s);*
- *distância vertical mínima entre o topo da barragem e o nível d'água máximo (d).*

O procedimento seguido baseia-se nos resultados de observações de casos reais, nas características do processo construtivo e nos requisitos de segurança. A *Figura 1* identifica quatro das variáveis citadas.

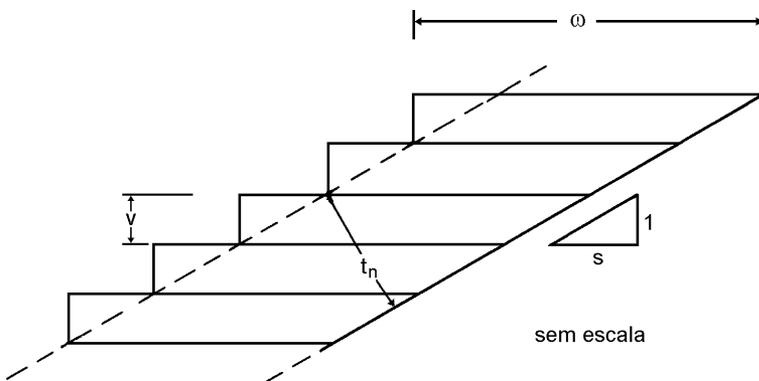


FIGURA 1 - Seção transversal típica do revestimento de solo-cimento

A espessura de cada plataforma horizontal acabada (**v**) é fixada, geralmente, entre 15 cm e 20 cm. É desaconselhável a adoção de espessuras superiores a 20 cm, posto que se tornaria difícil executá-las em camada singular sem que se deixasse de comprometer as condições ótimas de compactação, impermeabilidade, coesão e resistência ao cisalhamento que o revestimento necessita mostrar. Isso porque raramente é possível conseguir plena aderência entre duas camadas executadas superpostas e sucessivamente, a não ser com o emprego de equipamentos requintados e com a tomada de medidas onerosas e, quase sempre, de eficácia duvidosa.

A largura das camadas horizontais (**ω**) é função do tipo e do tamanho do equipamento de construção utilizado; varia de 2,0 m a 3,0 m. Quando se emprega, como é usual, o equipamento de pavimentação de solo-cimento, o valor típico é de 2,4 m.

O revestimento de solo-cimento permite, facilmente, projetar declividades (**1:s**) bem mais acentuadas do que aquelas admissíveis nos casos em que se empregam outros tipos de materiais. Habitual é a opção por taludes de 1:2 ou 1:2,5, por exemplo, enquanto que proteções formadas por empedramento (*rip-pap*) exigem declividades muito mais atenuadas.

Para garantir a adequada proteção do maciço, pela resistência do solo-cimento à ação combinada da água represada e da chuva (*molhagem*), do sol e do vento (*secagem*) e do atrito com partículas sólidas em suspensão no fluxo (*desgaste*), é necessário existir uma certa espessura de cobrimento (**t_n**). A experiência mostrou que espessuras de 30 cm de recobrimento são plenamente viáveis e eficientes; hoje, entretanto, condicionantes de ordem prática e de segurança exigem que, estabelecidos os valores das demais variáveis, seja calculado o valor mínimo admissível para **t_n**, com a fórmula:

$$t_n = \frac{\omega - S \cdot V}{(S^2 + 1)^{1/2}} \quad [1]$$

na qual:

t_n = espessura do revestimento, medida perpendicularmente ao paramento, m

ω = largura do revestimento, medida no topo, m

s = declividade do talude

v = espessura de cada camada, medida verticalmente, m

A *Figura 2* é um ábaco que permite a determinação gráfica de t_n , dados ω , s e v . Em certos casos pode ser necessário partir de uma espessura t_n desejável e, então, determinar a largura, considerados s e v . Da mesma figura, constam dois exemplos de utilização do ábaco. No primeiro, os dados são:

$$\omega = 2,4 \text{ m}$$

$$s = 2,5$$

$$v = 0,20 \text{ m}$$

o que leva a:

$$t_{n\text{mín}} \cong 0,70 \text{ m}$$

O segundo exemplo considera, previamente, que a espessura do revestimento deve ser igual a 0,50 m; para uma declividade de 1:3,5 e altura de camada igual a 0,15 m, vem que:

$$\omega \cong 2,30 \text{ m}$$

Uma técnica alternativa de projeto, que permite o acréscimo de largura da plataforma de trabalho, é inclinar o revestimento em relação ao talude do maciço. Essa inclinação suplementar é admitida até valores próximos a 1:8, o que possibilita, ainda, uma pequena melhoria na drenagem da superfície da plataforma ao ser executada.

Na *Figura 3* é mostrada a configuração da seção inclinada. A fórmula de cálculo passa a ser¹:

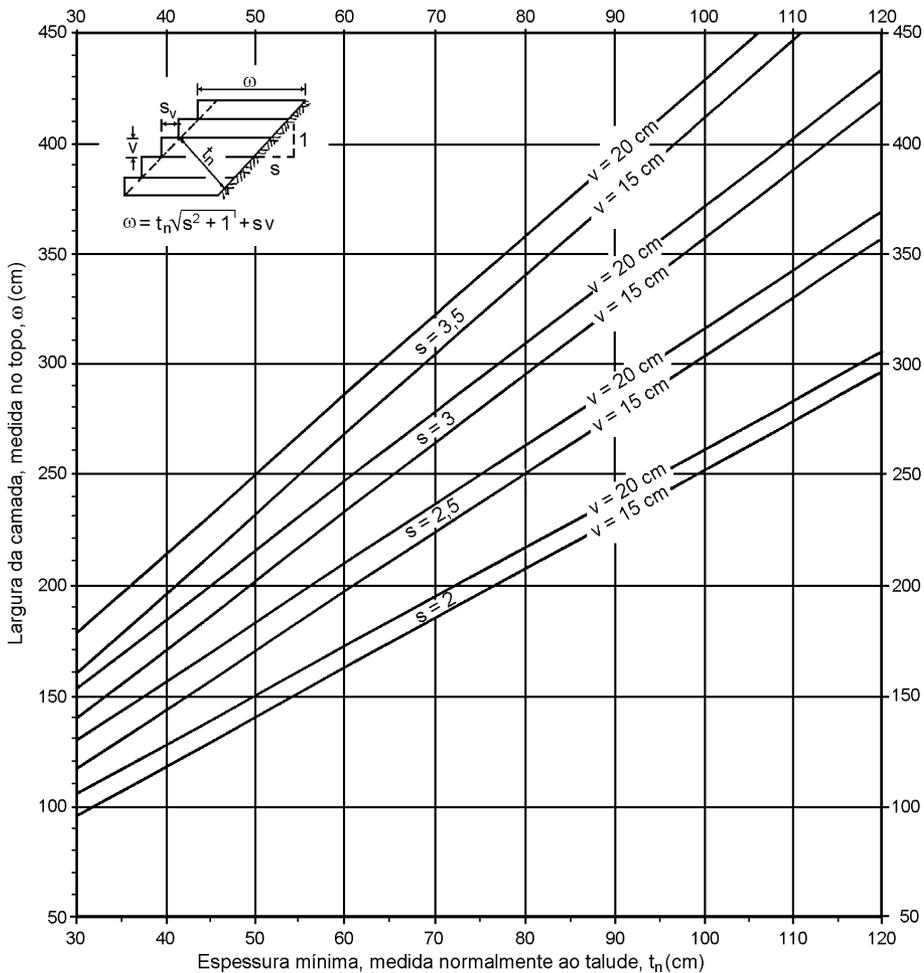
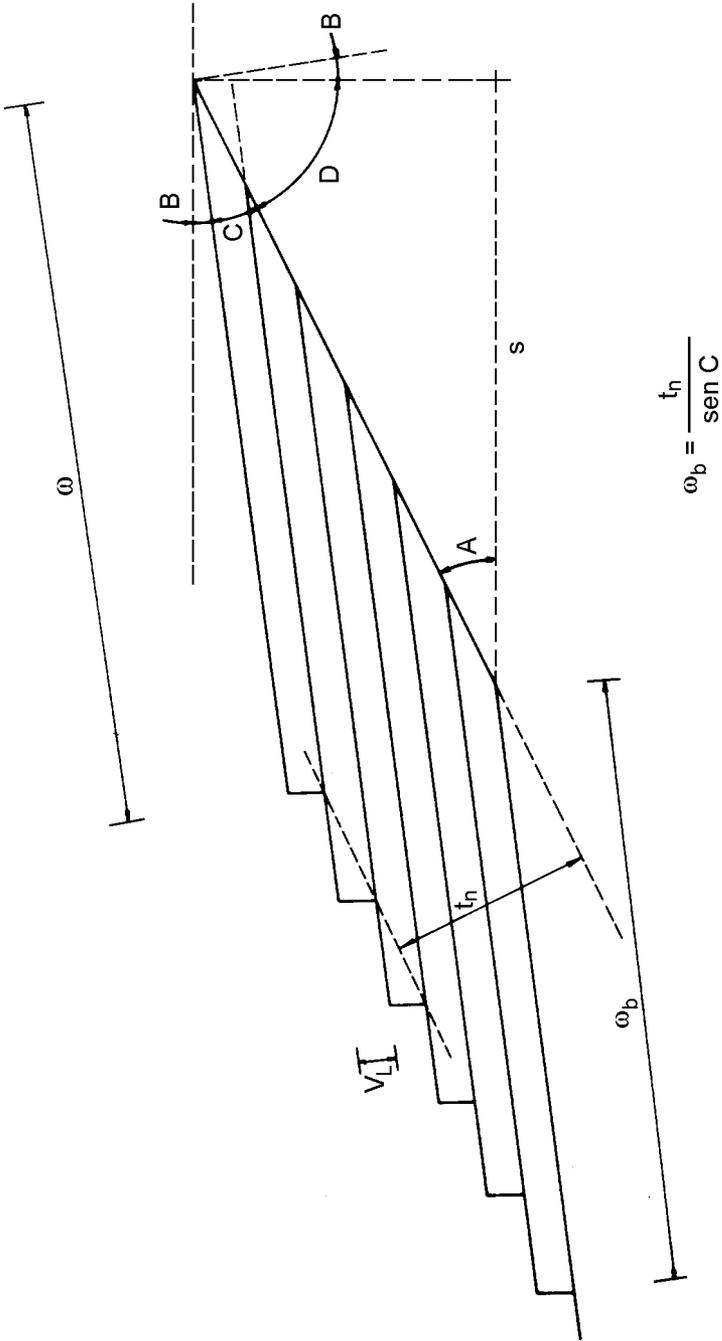


FIGURA 2 - Ábaco para a determinação de ω ou t_n



$$\omega_b = \frac{t_n}{\sin C}$$

FIGURA 3 - Seção típica do revestimento inclinado em relação à horizontal

$$\omega_t = \frac{t_n}{\text{sen } C} + V_L \times \tan D - V_L \times \tan B \quad [2]$$

e:

$$C = A - B$$

$$D = 90^\circ - C$$

Veja-se a *Figura 4*. Alí:

$$V_L = 0,20 \text{ m}$$

$$t_n = 0,80 \text{ m}$$

$$B = \arctan 1/8 = 7^\circ 6'$$

$$A = \arctan 1/2,5 = 21^\circ 48'$$

$$C = A - B = 21^\circ 48' - 7^\circ 6' \quad \therefore \quad C = 14^\circ 42'$$

$$D = 90^\circ - C = 90^\circ - 14^\circ 42' \quad \therefore \quad D = 75^\circ 18'$$

portanto:

$$\omega_t = \frac{0,80}{0,25} + 0,20 \times 3,81 - 0,20 \times 0,12 \quad \therefore \quad \omega_t = 3,94 \text{ m}$$

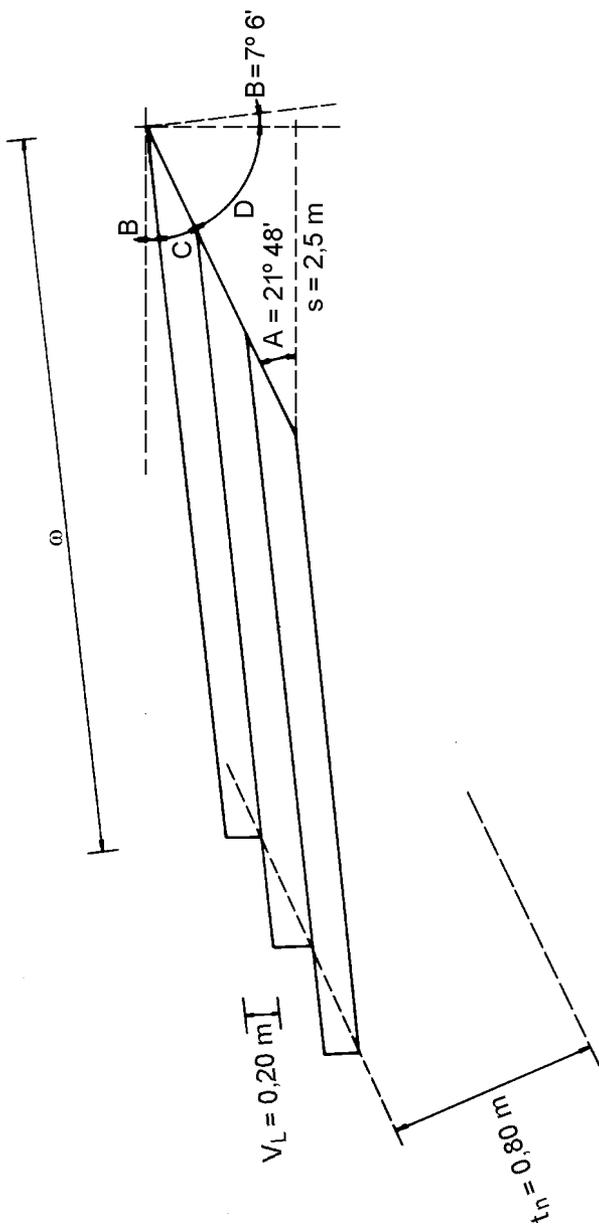


FIGURA 4 - Seção inclinada do exemplo do texto

A ocorrência de ondas geradas pelos ventos, quebrando contra o paramento de montante, pode causar o transbordamento ou, até, a danificação do topo da barragem ou dique. Daí a necessidade de, no projeto, providenciar para que seja mantida uma distância mínima entre a crista da estrutura e o nível máximo de água que o reservatório pode atingir, em função da máxima altura de onda. Esta é estreitamente ligada à velocidade do vento, à superfície do reservatório exposta à ação do vento, à duração deste, à lâmina d'água e às características da própria onda, entre outras variáveis. Pela dificuldade de avaliá-las precisamente, não há uma maneira que as correlacione de forma exata e definitiva, e, portanto, não se pode recomendar como absoluta uma dentre as diversas fórmulas de cálculo. Assim, parece melhor estabelecer valores práticos seguros, que se liguem mais à comprovação experimental do que à teoria. A PCA recomenda para a distância entre o topo da barragem e o nível máximo d'água do reservatório os valores de 1,2, 1,3 ou 1,4 vezes a altura máxima de onda, conforme o tipo de superfície do revestimento seja em degraus, arredondado ou liso, respectivamente. Na verdade, o valor utilizado correntemente é o mínimo de 1,5 m acima da cota máxima do reservatório, o que garante completa segurança mesmo nas condições mais desfavoráveis.

Uma medida de valor inestimável para a durabilidade do revestimento é, ao lado da manutenção da distância mínima entre o topo da barragem e o nível do reservatório, a extensão da plataforma superior do revestimento ao topo da barragem (ver *Figura 5*), o que previne a erosão da proteção a partir dessa região.

2 DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO

As condições peculiares de solicitação a que um revestimento de uma estrutura é submetido tornam imprópria, quase sempre, a utilização pura e simples dos critérios de fixação do teor de cimento desenvolvidos para pavimentos. Os efeitos combinados dos ciclos alternados de molhagem e secagem, da ação contínua das ondas e do eventual choque de partículas sólidas, muito distintos dos fatores solicitantes de uma rodovia, podem causar sérios danos, afetando a durabilidade do revestimento, se este não possuir o grau de estabilização conveniente — este proporcionado, em última análise, pela conjugação dos parâmetros *tipo de solo*, *teor de cimento*, *teor de umidade na compactação* e *grau de compactação*.

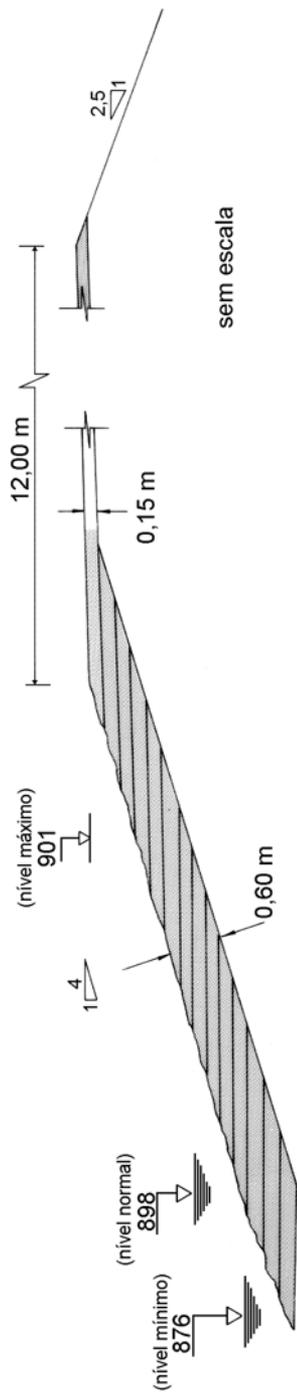


FIGURA 5 - Corte transversal da barragem de Merrit (Nebraska, EUA), mostrando a extensão do solo-cimento ao topo da estrutura (Cf. Ref. 1)

Com relação aos tipos de solos empregáveis com bom sucesso no revestimento de solo-cimento, pode-se afirmar que, a não ser os solos finos dos tipos A6 e A7 (classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO*), todos os outros já o foram, em barragens, canais, diques ou reservatórios. Toda e qualquer espécie de cimento portland normalizada no País também é plenamente utilizável, devendo-se cuidar, entretanto, que cimentos portland que possam vir a incrementar a retração do solo-cimento (como o de alta resistência inicial, por exemplo) sejam aplicados com as devidas precauções, no tocante à cura, ao teor de água em relação aos materiais secos e ao próprio teor de cimento — os dois últimos itens estritamente ligados à dosagem do material.

A compactação, por sua vez, não necessita ser completada em altos níveis, bastando, como no solo-cimento comum de pavimentação, adotar a energia normal e um grau de compactação de 100% em relação ao valor de referência da massa específica aparente seca máxima alcançada nessa energia.

Os métodos de ensaio a seguir quando se trata de determinar o teor de cimento que estabiliza, nas condições convencionadas, um certo solo, são:

- *ABCP SC-1 - Ensaio de Compactação de Solo-Cimento (ASTM D 558)*
- *ABCP SC-2 - Moldagem de Corpos-de-Prova de Solo-Cimento*
- *ABCP SC-3 - Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem de Corpos-de-Prova de Solo-Cimento (ASTM D 560)*
- *ABCP SC-4 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples de Corpos-de-Prova de Solo-Cimento*

Preferencialmente, tem-se servido do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem^(*) para o estabelecimento do teor de cimento, independentemente da espécie de solo com que se lida. É possível, entretanto,

(*) Nas regiões onde necessário, o ensaio de durabilidade por congelamento e degelo (ASTM D 599) é executado paralelamente.

efetivar a dosagem através do método simplificado que se baseia na resistência à compressão simples a 7 dias, sempre que a matéria-prima seja um solo com um máximo de 50% de silte mais argila, não mais do que 20% de argila e menos do que 45% de pedregulho graúdo. Qualquer que seja o processo de dosagem, é preciso ajustar o teor de cimento encontrado às necessidades específicas da aplicação; o ajuste deve tomar em consideração a região do paramento a ser revestida e o seu relacionamento com o regime — permanente ou temporário — de exposição da superfície do revestimento naquela região.

NUSSBAUM e *COLLEY*⁴ realizaram extensa pesquisa de laboratório, em modelos reduzidos e outras formas de investigação, durante a qual analisaram, entre outros fatores, o efeito do teor de cimento no comportamento de solos estabilizados, sob condições equivalentes às que sucedem numa barragem, canal ou estrutura similar. Baseando-se nesta e em diversas outras fontes, principalmente originárias da prática, a *Portland Cement Association*^{6, 4} orienta que:

- a) *o solo-cimento destinado a revestir as regiões situadas a mais de 1,5 m abaixo do nível mínimo d'água deve receber o teor de cimento fornecido pelos critérios de perda de massa ou resistência à compressão simples aos 7 dias, conforme o caso;*
- b) *as regiões situadas acima daquela cota deverão conter 2 pontos percentuais além do teor de cimento determinado pelos critérios mencionados;*
- c) *caso o solo original possua mais do que 50% de partículas finas (menores do que 0,075 mm), o aumento do teor de cimento, nas condições citadas no item anterior, será de 4 pontos percentuais;*
- d) *nas regiões sujeitas a fluxo rápido de água, em presença de detritos sólidos, o teor de cimento será 2 pontos percentuais superior ao indicado pelos ensaios de dosagem, e o solo matéria-prima deverá conter 20% ou mais de pedregulho; se a corrente for isenta de sólidos, o teor poderá ser igual ao definido pelos ensaios correntes, e o solo não necessitará conter o teor mínimo de pedregulho antes exigido.*

Referências Bibliográficas

1. PORTLAND Cement Association (PCA). *Soil-cement slope protection for embankments; planning and design*. Skokie, 1975. (IS173.02W).
2. _____. *Soil-cement water barriers for earth dams*. Skokie, 1970. (MS253.01W).
3. _____. *Soil-cement for dams; contracts awarded*. Skokie, 1971. (MS004.02W).
4. NUSSBAUM, P. J. & COLLEY, B. E. *Dam construction and facing with soil-cement*. Skokie, PCA, 1971. (RD010.01W).
5. HOLTZ, W. G. & WALKER, F. C. *Soil-cement as slope protection for earth dams*. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, New York, 88(SM6): 107-134, Dec. 1962.
6. PORTLAND Cement Association (PCA). *Soil-cement for water control; laboratory tests*. Skokie, 1976. (IS166.02W).

