

DEFESA DE TALUDES CONTRA A EROSÃO. CRITÉRIOS DE SELECÇÃO DE SOLOS*

Preventive measures against slope erosion. Criteria for soil selection

por

ÚLPPIO NASCIMENTO** e ELDA DE CASTRO***

RESUMO – Na formulação do problema da erosão de taludes em termos geotécnicos considera-se a tensão tangencial devida à erosividade das chuvas contra a resistência ao corte dos terrenos.

Recorre-se para isso, por um lado, ao conceito de força de arrastamento utilizado em engenharia hidráulica no escoamento de canais estendendo-o ao escoamento superficial em taludes e, por outro lado, à lei de Coulomb generalizando-a à resistência ao corte de terrenos submetidos a esse escoamento.

A partir dessa formulação e de estudos anteriores sobre erodibilidade, expansibilidade e petrificação sugerem-se, a título preliminar, critérios para a escolha de solos resistentes à erosão e dão-se indicações sobre investigações a prosseguir.

SYNOPSIS – In formulating the problem of slope erosion, in geotechnical terms, there is considered the tangential stress due to rain erosivity, against the shear resistance of the soil.

For this purpose, use is made, on the one hand, of the concept of tractive force used in hydraulic engineering for flow in channels this concept being extended to surface runoff on slopes and, moreover, of Coulomb's law, which is generalized to shear resistance in soils subjected to such runoff.

On the basis of this formulation and of previous studies on erodibility, swelling and petrification, suggestions are made, in a preliminary stage, as regards criteria for the choice of erosion-resistant soils, and indications are given on research to be carried out.

INTRODUÇÃO

Os problemas da erosão de taludes há anos que vêm sendo objecto de estudos no LNEC, incidindo principalmente na definição dos critérios de erodi-

* Trabalho apresentado no 2.º Congresso Internacional de Geologia de Engenharia, S. Paulo, 1974. Recebido para publicação na GEOTECNIA em Novembro de 1976.

** Investigador do LNEC.

*** Especialista do LNEC.

bilidade dos solos com vista a orientar a sua escolha para utilização em taludes [1, 2, 3, 4, 5]. Esses estudos foram recentemente intensificados porque, como se sabe, o problema está ainda muito longe de se poder considerar convenientemente esclarecido e também porque a erosão de taludes vai assumindo importância crescente à medida que, por um lado, aumenta a envergadura e o número de obras de engenharia que provocam ou são afectadas por ela, por outro lado, crescem as preocupações com a poluição do ambiente e portanto com a parte dessa poluição que lhe pode ser imputada.

No presente trabalho formula-se o problema da erosão de taludes em termos geotécnicos e a partir de anteriores investigações sobre erodibilidade, expansibilidade e petrificação de terrenos [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] sugerem-se, ainda que a título preliminar, critérios para a escolha de solos resistentes à erosão.

O interesse em apresentar esses critérios ainda preliminares e insuficientemente quantificados é o de estimular a observação sistemática de taludes naturais em diferentes condições geoclimáticas, pois se julga ser essa uma das vias mais frutuosas para a investigação deste problema.

ANÁLISE GEOTÉCNICA DO PROBLEMA

Erosividade das chuvas

A *erosividade* das chuvas, isto é, a sua qualidade de provocar a erosão dos terrenos, é devida a dois factores principais: a energia de impacto no terreno dos pingos de chuva e a força de arrastamento do caudal de escoamento sobre a superfície do terreno.

Quanto ao caudal de escoamento, único desses factores considerado neste trabalho, o mecanismo pelo qual ele promove a erosão pode esquematizar-se do seguinte modo:

Considere-se na Fig. 1 que o caudal de escoamento forma sobre o talude uma camada de espessura uniforme. Essa camada líquida exerce sobre a superfície do terreno uma tensão tangencial T_w que, supondo o talude infinito, é dada pela conhecida expressão relativa aos taludes infinitos

$$T = \gamma h \sin \beta \cos \beta \quad (1)$$

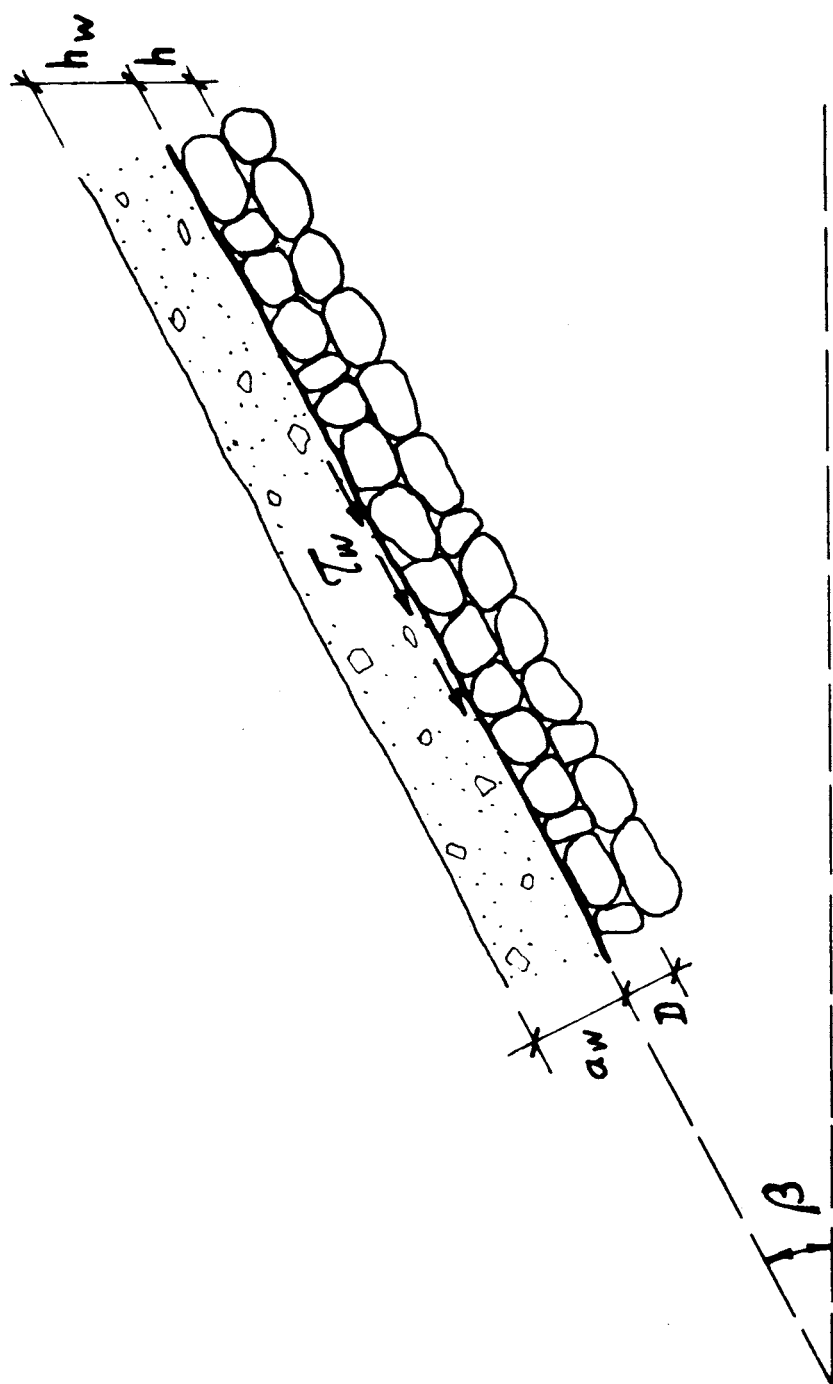


Fig. 1 – Escoamento laminar uniforme em talude infinito

que nada impede de aplicar também à camada líquida formada pelo caudal de escoamento [9] desde que se substitua o peso específico aparente do terreno γ pelo dessa camada líquida γ_w .

Então, pondo $h = h_w$ e fazendo $h_w \cos \beta = a_w$ ter-se-á

$$T_w = \gamma_w a_w \sin \beta \quad (2)$$

Esta tensão tangencial não é mais do que a “tractive force” ou “força de arrastamento” considerada em Hidráulica na erosão de canais, uma vez que $\sin \beta$ é o gradiente hidráulico do canal, praticamente igual à inclinação ($\tan \beta$) quando esta é pequena.

Quando esta força de arrastamento, ou, mais propriamente, essa *tensão de arrastamento* T_w , atinge, para um certo terreno, um determinado valor limite, as partículas do terreno começam a deslocar-se iniciando-se a erosão. Essa tensão limite de arrastamento poderá então designar-se *tensão de erosão*, T_e .

Se a lâmina de água que se escoar pelo talude é constituída apenas por água limpa proveniente da chuva, a sua espessura a_w pode ser deduzida da expressão

$$l a_w u = Q \quad (3)$$

sendo Q o caudal proveniente da chuva que se escoar com a velocidade u (m/min) ao longo duma faixa do talude de largura l .

E o valor desse caudal a uma distância L (m) medida a partir da crista do talude e correspondente à faixa de largura l (m) será dada por

$$Q = CIL \text{ (litros/min)}, \quad (4)$$

onde C é o coeficiente de escoamento e $I = \Delta p / \Delta t$ é a intensidade de precipitação em mm/min.

Tirando da igualdade entre (3) e (4) o valor de a_w e substituindo-o em (2) obtem-se a seguinte expressão da tensão de arrastamento

$$T_w = C \gamma_w \frac{I}{u} L \sin \beta \quad (5)$$

Erodibilidade dos terrenos

A *erodibilidade* dum terreno em relação às chuvas é tanto menor quanto maior for a resistência que o terreno oferece à sua acção erosiva.

A força que se opõe ao arrastamento dos grãos de terreno pelo talude abaixo é a resistência que se desenvolve entre a camada dos grãos superficiais e a camada subjacente. Essa resistência, em princípio, não é mais do que a resistência ao corte dada pela conhecida lei de Coulomb

$$s = c + \sigma \operatorname{tg} \emptyset \quad (6)$$

onde c é o coeficiente de coesão, $\emptyset$ o ângulo de atrito interno e σ é a tensão normal na superfície de separação das camadas, dada por

$$\sigma = \gamma h \cos^2 \beta \quad (7)$$

No caso esquematizado na Fig. 1, h corresponde aproximadamente à dimensão dos grãos, indicada por D , e o peso específico a considerar deverá ser o peso específico do terreno submerso γ' ; ter-se-á pois, visto que $D = h \cos \beta$,

$$\sigma = \gamma' D \cos \beta \quad (8)$$

ou, substituindo em (6),

$$s = c + \gamma' D \cos \beta \operatorname{tg} \emptyset \quad (9)$$

Por outro lado, as condições especiais em que se manifesta a resistência friccional dada pela segunda parcela de (9) são muito diferentes daquelas para as quais é usualmente definido $\emptyset$ e, também, o peso $\gamma' D$ que determina a resistência friccional. Basta, por exemplo, que a velocidade de escoamento seja suficientemente elevada e o escoamento passe de laminar a turbulento para que os grãos do terreno fiquem sujeitos a vibrações que diminuem a referida resistência friccional. Para ter em conta essas condições especiais, duma forma global, afectaremos a referida parcela dum coeficiente b cujo valor deverá estar compreendido entre zero e a unidade.

Da expressão (9) obter-se-á então a seguinte forma da lei de Coulomb generalizada ao escoamento superficial em taludes

$$s_w = c + b \gamma' D \cos \beta \operatorname{tg} \emptyset \quad (10)$$

É claro que se a superfície do talude já estiver ravinada a parcela friccional da resistência sofrerá uma diminuição.

Grande parte das informações disponíveis sobre a resistência à erosão dos solos incoerentes, isto é, daqueles em que é nula a coesão c (10), provém dos estudos sobre a estabilidade dos fundos e margens de canais, resumidas por

Lane [10] e das quais um dos pontos mais importantes é a relação entre o tamanho dos grãos do terreno e a tensão crítica de arrastamento, isto é, a tensão de erosão (T_e).

Para os materiais grosseiros ($d_{50} > 5 \text{ mm}$) a recta com a equação

$$T_e = 100 D \quad (11)$$

em que T_e é expresso em gf/m^2 e D em mm , traduz aproximadamente a experiência dos canais.

Para um terreno sem coesão ($c=0$) e para $\gamma' = 0,9 \text{ tf/m}^3$ e $\varnothing = 35^\circ$, valores que parecem razoáveis para os materiais mais grosseiros ($D_{50} > 5 \text{ mm}$), e tomando $\cos \beta = 1$, visto que nos canais a inclinação é muito pequena, a recta dada por (11) corresponde o coeficiente $b = 0,16$.

Para os materiais finos ($D_{50} < 5 \text{ mm}$) já a experiência dos canais dá tensões de erosão superiores à correspondente à equação (11). As razões dessa maior resistência à erosão, parecem ser duas, principalmente: em primeiro lugar a essas tensões de arrastamento mais baixas correspondem velocidades menores e, portanto, menores turbulências e consequentemente maiores valores do respectivo coeficiente b ; e em segundo lugar para esses materiais mais finos poderá já fazer-se sentir a influência de alguma coesão na resistência à erosão, sobretudo quando a água tem sedimentos em suspensão, cuja deposição acaba com o tempo por contribuir por meio dum “efeito de cimentação”, para o aumento da coesão [10].

No que se refere à resistência à erosão dos terrenos coerentes, as informações disponíveis são muito precárias. Existem recomendações feitas por alguns autores nas quais os terrenos são caracterizados em termos pouco precisos e em que a resistência à erosão é dada em velocidade de erosão [1, 10].

Vejamos como a coesão dos terrenos contribui para a sua resistência à erosão.

A coesão dos terrenos pode dividir-se em dois tipos: *coesão não pétrea*, que predomina nos solos e que desaparece quando uma pequena porção do solo é imersa em água; e *coesão pétrea*, resultante da *petrificação*, que predomina nas rochas e que se mantém mesmo com essa imersão. Em terrenos de transição entre solos e rochas, como sejam alguns solos mais ou menos petrificados (arenitos, siltitos e argilitos) ou rochas muito alteradas (saibros graníticos, xistos alterados, etc.), existem os dois tipos de coesão e tem-se procurado quantificar a respectiva contribuição no comportamento do terreno perante a água através do *grau de petrificação* [7] que adiante se referirá.

A coesão não pétrea pode, por sua vez, ser de diferentes naturezas. Nos solos não saturados, pode identificar-se uma *coesão aparente*, devida como se sabe aos meniscos capilares da água do solo.

Um segundo tipo de coesão não pétrea é a devida às forças de Van der Waals existentes entre os grãos do solo e que são tanto maiores quanto menores são as partículas e as distâncias entre elas, ou seja, menores são os respectivos vazios. Esta coesão é portanto diminuída quando o solo, em contacto com a água, a absorve e se expande, aumentando o afastamento entre as partículas.

Um terceiro tipo de coesão não pétrea é revelado principalmente pelos materiais incoerentes grosseiros, por efeito conjugado do *travamento* entre grãos e duma certa contenção lateral.

É claro que a resistência à erosão dum solo é muito diferente consoante essa coesão é ou não pétrea, pois que, no primeiro caso, ela subsiste mesmo quando a superfície do terreno é submetida à acção da água em movimento; e no segundo o contacto do terreno com a água em escoamento tende a diminuir e mesmo a anular essa coesão. A resistência à erosão dum solo sem qualquer petrificação, se for muito fino (silte ou argila) depende apenas da permanência da sua coesão não pétrea em contacto com a água em escoamento. Como neste caso de solo fino o efeito de travamento é insignificante, e como a coesão aparente desaparece em contacto com a água, a única coesão que poderá permanecer é a devida às forças de Van der Waals. E como, por outro lado, esta só permanecerá na medida em que o solo não for expansivo, conclui-se que é a expansibilidade a característica com maior significado no que respeita à resistência à erosão de solos finos.

Efectivamente, estudos realizados no LNEC mostraram que a expansibilidade é a característica que melhor correlação apresenta com a respectiva erodibilidade [2, 3, 4, 5]. Esses estudos, nos quais se determinaram as principais características geotécnicas e físico-químicas dos solos, mostraram, com efeito, que a expansibilidade, determinada em ensaio desenvolvido no LNEC [6], permitiu identificar 16 dos 21 solos com mau comportamento à erosão [5]. Há contudo que ter em atenção que, para que o comportamento do solo seja comandado pela fracção fina, é necessário que esta exista em quantidade suficiente, pelo que a granulometria é outro parâmetro importante [5].

Comparação com os pavimentos rodoviários

Com o fim de tentar definir um critério, ainda que preliminar, para a

definição das características de solos resistentes à erosão, especialmente no que se refere à maneira de considerar a expansibilidade dos solos na previsão do seu comportamento perante a erosão, interessa recordar a maneira como a expansibilidade é tida em consideração na estabilização mecânica de solos em pavimentos de estradas, visto haver algumas analogias entre o papel desempenhado pela expansibilidade dos solos em pavimentos de estradas e em taludes.

As principais diferenças entre a camada dum pavimento e a camada dum talude são as de solicitação e as de estado de tensão: a principal solicitação na camada dum pavimento é a compressão provocada pelas rodas dos veículos, enquanto que na camada dum talude é a tensão de arrastamento provocada pelo escoamento superficial.

Apontadas estas diferenças, vejamos como é que a expansibilidade é considerada na estabilização mecânica.

A expansão dum solo quando absorve água é tanto menor quanto maior for a pressão a que está submetido, e a pressão capaz de anular essa expansão é numericamente igual à *pressão de expansão* do solo.

A pressão de expansão dum solo saturado depende da sua compacidade e dum conjunto de características físico-químicas, mas ainda não se sabe correlacionar convenientemente estes parâmetros com a referida pressão de expansão de modo a permitir calculá-la a partir deles.

No entanto na prática corrente não é a partir da expansibilidade nem da pressão de expansão que se estabelecem as especificações de estabilização de solos mas sim a partir dos limites de Atterberg. Vejamos as correlações que há entre esses limites e a expansibilidade, e que conferem suporte às especificações correntes.

Tanto no ensaio do limite de liquidez como no do limite de plasticidade determina-se experimentalmente o teor em água que confere ao solo uma determinada resistência às deformações impostas pelo ensaio. Por outro lado, quando o solo passa do limite de plasticidade ao limite de liquidez experimenta uma variação de volume que pode ser avaliada por intermédio do respectivo índice de vazios (e) dado pela expressão:

$$e = \frac{GW}{S_r} \quad (12)$$

em que G – densidade, W – teor em água, S_r – grau de saturação.

A expansão que o solo experimenta quando passa do limite de plasticidade ao limite de liquidez, correspondente portanto ao índice de plasticidade I_p , é pois dada por

$$\varepsilon_p = \frac{e_L - e_p}{1 + e_p} \times 100 \quad (13)$$

mas como $e_L = \frac{GW_L}{S_{rL}}$ e $e_p = \frac{GW_p}{S_{rP}}$ será

$$\varepsilon_p = \frac{G}{1 + e_p} \left(\frac{W_L}{S_{rL}} - \frac{W_p}{S_{rP}} \right) \times 100\% \quad (14)$$

e, cometendo-se o erro de supor $S_{rP} = 100\%$, ter-se-á a seguinte expressão aproximada:

$$\varepsilon_p = \frac{G}{1 + e_p} I_p \% \quad (15)$$

Do exposto ressalta a correlação que existe entre as solicitações a que o solo é submetido nos ensaios do limite de plasticidade e do limite de liquidez e a expansão que o solo presumivelmente experimentaria se, em contacto com a água e *por si próprio*, passasse do estado de solicitação correspondente ao limite de plasticidade para o correspondente ao limite de liquidez.

O princípio que está na base da regra semi-empírica baseada no I_p é pois o de limitar a expansão do solo quando colocado em condições de descompressão e de poder absorver água livremente. Essa expansão é a que corresponde sensivelmente à passagem dum solo com o teor óptimo de compactação muito próximo do W_p até à sua transformação em lama, próximo portanto do W_L .

A outra regra que limita o valor máximo do limite de liquidez corresponde também à limitação da expansão quando o solo passa dum estado de secura correspondente ao limite de retracção W_S , até se tornar em lama. Esta outra limitação é necessária, pois que o I_p pode ser baixo e satisfatório, mas, se o W_L é elevado, podem ser excessivas as variações volumétricas até ou desde o referido estado de secura.

A larga experiência rodoviária aconselha para camadas de desgaste sem revestimento de pavimentos $4 \leq I_p \leq 9$, $W_L \leq 35$.

Como esta experiência foi apurada principalmente em solos de regiões de climas temperados, a regra semi-empírica que nela se apoia só será válida em regiões de clima análogo.

Os solos lateríticos, que abundam nos climas tropicais, como consequência da sua fracção argilosa ser constituída essencialmente por caulinite

e óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio em elevada proporção, têm um comportamento peculiar, especialmente no que respeita à expansibilidade [8, 11, 12]. Nos estudos citados, verificou-se, com efeito, que estes apresentavam expansibilidades mais baixas que os solos não lateríticos com o mesmo I_p ou W_L . Como tal rejeição não tem, portanto, justificação técnica, procurou-se ajustar a especificação corrente completando-a com uma condição limitativa da expansibilidade do solo, sugerindo-se, provisoriamente, a especificação $6 \leq I_p \leq 15$, $W_L \leq 40$, $\epsilon \leq 10\%$.

Solos incoerentes ou coerentes com finos expansivos

A resistência à erosão dos solos incoerentes no fundo de canais traduz-se, como se viu, pela equação (11). Estão nestas condições os solos de granulometria relativamente grosseira e cuja fracção passada no peneiro n.º 40 (0,425 mm) não apresenta plasticidade. Destes os mais erodíveis serão possivelmente os arenosos finos (tipo A-3) com tamanhos médios D_{50} da ordem de 0,1 a 0,5 mm e resistência à erosão de 10 a 50 gf/m², se for legítima a extrapolação para $D_{50} < 5$ mm. Para que a resistência à erosão suba até valores superiores ao milhar de gf/m², correspondente a taludes com lâminas de escoamento de alguns milímetros de espessura (de acordo com (2)), será necessário que o tamanho médio das partículas dos solos suba até cerca de 10 mm, isto se a equação (11), deduzida para os canais, continuar válida para os taludes. Nesse caso, julga-se que solos dos tipos A, B e C da especificação AASHO M 147-65 – Materials for Aggregate and Soil – Aggregate Subbase, Base and Surface Courses satisfarão a tais condições.

Outras granulometrias com análogos tamanhos médios mas mais uniformes do que as A, B e C poderão também satisfazer provavelmente. Referem-se estas porque são de uso geotécnico mais corrente.

Note-se porém que mesmo solos coerentes, isto é, cujos finos exibem plasticidade, podem comportar-se como incoerentes quanto à erosão, desde que os finos sejam suficientemente expansivos para que a sua coesão, na superfície do terreno em contacto com a água de escoamento, praticamente se anule. Para isso basta que a expansibilidade seja elevada, possivelmente superior a 10%. Nota-se, com efeito, que foi de 11% o limite superior da expansibilidade dos solos que, nos estudos do LNEC, se revelaram com boa resistência à erosão [2, 3, 4, 5]. Poderá então concluir-se que estes solos não resistirão normalmente

à erosão em taludes, a não ser que a sua granulometria satisfaça às condições dos solos incoerentes, acima referidos.

Deste modo, e a título muito preliminar, ter-se-ia a seguinte indicação para a estabilização mecânica contra a erosão de solos incoerentes (NP) ou comportando-se como tal em face da erosão (solos com finos expansivos – $\epsilon > 10\%$):

- A granulometria deverá satisfazer às bandas granulométricas A, B ou C da Especificação AASHTO M 147-65.

Solos coerentes sem petrificação

Em relação aos solos coerentes convirá distinguir os solos sem qualquer petrificação daqueles que têm alguma.

O primeiro caso pode dizer respeito tanto a taludes de aterro como de escavação, enquanto que o segundo interessa especialmente aos taludes de escavação, pois que só nesses é que a petrificação existente no solo não é destruída pelas terraplenagens.

Nos solos coerentes sem petrificação a resistência à erosão depende sobretudo da fracção fina, parecendo, em primeira aproximação, que o principal condicionamento granulométrico da fracção grosseira é o de que a sua proporção se mantenha dentro dos limites em que o solo se comporte como coerente.

Nos trabalhos anteriormente citados [2, 3, 4, 5] em que se estudou o comportamento de taludes naturais de solos com diferentes características geotécnicas e físico-químicas, não se observou nenhum solo com comportamento satisfatório que tivesse uma quantidade de finos passados no peneiro de 0,425 mm (n.º 40) inferior a 49% (ou em que a constante granulométrica a [13] fosse inferior a 0,52). É possível porém que este limite seja dependente da qualidade desses finos e que possam satisfazer valores mais baixos. Não parece também conveniente que todo o material passe no peneiro de 0,425 mm (n.º 40).

A qualidade dos finos revela-se, neste caso, de extrema importância, tendo sido a expansibilidade a característica mais significativa com o limite de 11% como valor máximo compatível com o bom comportamento do solo, como se referiu. Não foi possível, neste estudo, definir um limite mínimo.

A consistência, outro parâmetro estreitamente correlacionado com a erodibilidade, apresentou como valor máximo admissível para o limite de liquidez 32 e para o índice de plasticidade 17. Atendendo a que para camadas de desgaste o valor

máximo de W_L especificado é de 35 e o do I_p 9, nota-se que há bom ajustamento pelo que diz respeito ao limite de liquidez e que é possível consentir um intervalo bastante maior em que o solo se comporta como plástico quando se trata de limitar a erodibilidade, o que se afigura razoável. Não foi possível também definir limites mínimos. Para as camadas de desgaste admite-se como limite inferior do I_p 4 (no caso dos solos lateríticos, atendendo ao atrás dito é possível que possa admitir-se um I_p mínimo de 6), e poderá talvez tomar-se este valor como ponto de partida para estabelecer a consistência mínima.

Do que fica exposto parece poder concluir-se que, no caso dos solos coerentes sem petrificação, será de considerar, como sugestão de critério de escolha de solos resistentes à erosão, a quantidade e qualidade da fracção fina com possivelmente os seguintes limites:

$$40 \leq \% \text{ passada no peneiro } 0,425 \text{ mm} \leq 90; \quad \varepsilon \leq 10\%; \quad I_p \geq 4$$

Solos coerentes com petrificação

Como se disse, este caso diz respeito aos taludes de escavação nos quais a existência de alguma petrificação pode melhorar a sua resistência à erosão.

Para identificar e quantificar essa petrificação propôs-se em trabalhos anteriores [7, 8] um ensaio de absorção, apresentado a este congresso*, realizado sobre pastilhas talhadas em amostras intactas, e a comparação do limite de absorção assim determinado (W'_A) com o teor em água calculado para saturar a amostra intacta sem variação de volume (W_o)**. Uma outra hipótese a encarar será a de determinar a expansão por meio de um ensaio adequado.

Com efeito entre a absorção e a expansão existe a seguinte relação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \times 100 = \frac{G(W'_A - W_o)/100}{1 + GW_o/100} \times 100$$

donde

$$W'_A = \left(1 + \frac{\varepsilon}{100}\right) W_o + \frac{\varepsilon}{G} \quad (16)$$

* Castro, E. de (1974) – Determination of Absortion Limits of Soils.

** Deve notar-se que este valor W_o é, evidentemente, variável com a humidade inicial da amostra intacta, e que o grau de petrificação dado pela relação W_o/W'_A é também variável e pode perder o significado, especialmente quando aquela humidade inicial é muito elevada. Por isso W_o deve ser determinado para o solo seco ao ar ou então, preferivelmente, para o solo seco em câmara com um estado higrométrico especificado.

Supondo G constante e constante também a expansão máxima compatível com a manutenção de ligações pétreas suficientes para assegurar o bom comportamento do solo perante a erosão, ter-se-ia entre W'_A e W_o para os solos resistentes à erosão, uma relação da forma:

$$W'_A \leq A W_o + B \quad (17)$$

Assim, por exemplo, tomando $G = 2,65$ e na hipótese da expansão máxima admissível ser de $\epsilon = 5\%$, ter-se-ia $A = 1,05$ e $B = 2$ e viria:

$$W'_A \leq 1,05 W_o + 2$$

A determinação da expansão máxima compatível com a manutenção de ligações pétreas suficientes para assegurar o bom comportamento do solo à erosão, para a determinação de A e B da expressão (17), parece ser do maior interesse.

ESCOLHA DE TERRENOS RESISTENTES À EROSÃO

Resumindo o que acaba de expor-se, na Fig. 2 apresentam-se os passos necessários à escolha de terrenos resistentes à erosão.

O primeiro passo será o de verificar se o solo é incoerente ou coerente, observando a sua granulometria e pressionando ligeiramente um torrão entre os dedos.

Se é incoerente será a granulometria o factor preponderante, e como indicação preliminar referem-se as granulometrias A , B e C da especificação AASHO M 147-65.

Se o terreno é coerente o procedimento será diferente conforme se destine a aterro ou a escavação.

Tratando-se de aterro, o segundo passo será determinar a expansibilidade; se esta for maior que 10%, para que o solo seja resistente à erosão, terá o seu comportamento de ser comandado pela fracção grossa e como tal sugerem-se as granulometrias A , B e C acima referidas; se a expansibilidade for menor que 10%, deverá a fracção fina existir em quantidade adequada e ter alguma plasticidade: sugere-se que a percentagem da fracção que passa no peneiro de 0,425 (n.º 40) esteja compreendida entre 40% e 90% e que o I_p seja maior do que 4*.

* Tratando-se de solos lateríticos, é provável que, à semelhança do que se propôs para as camadas de desgaste, o I_p deva ser maior que 6.

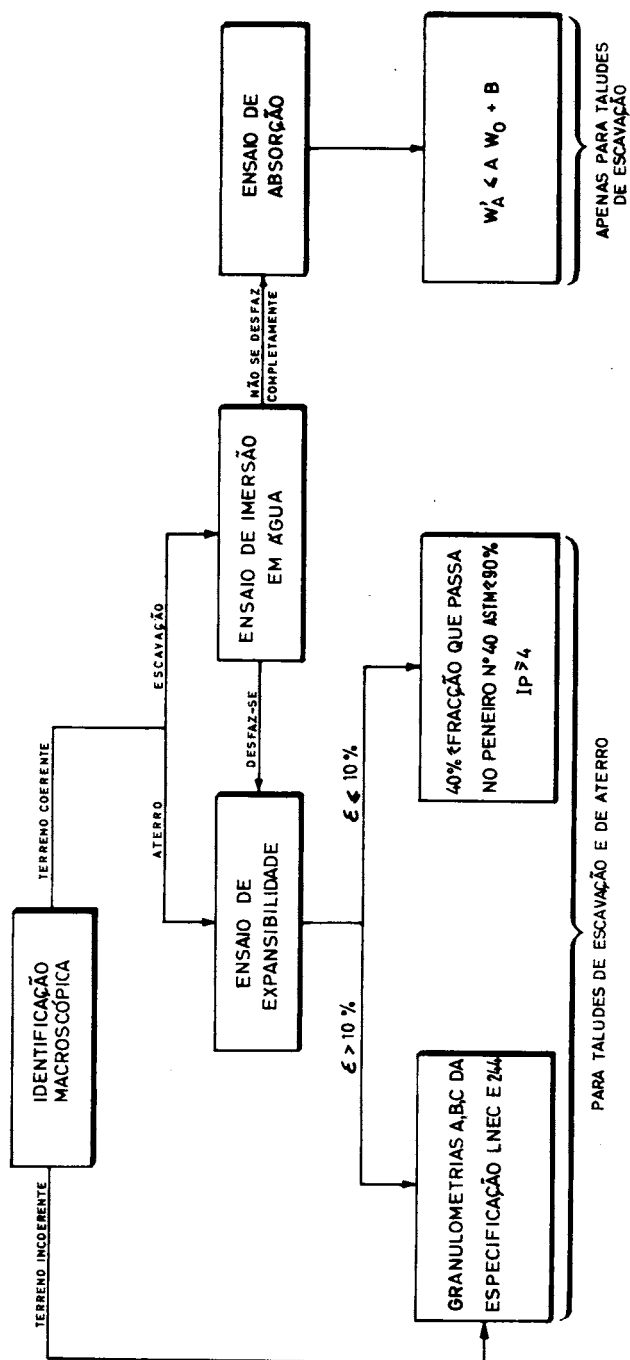


Fig. 2 – Passos para a escolha de terrenos resistentes à erosão

Se se tratar de escavação o segundo passo será verificar se o terreno tem alguma petrificação para o que se mergulha em água um pequeno torrão e se observa o seu comportamento (slaking test). Se o torrão se desfaz completamente, é porque não possui nenhuma coesão pétrea e haverá então que determinar a sua expansibilidade e aplicar um dos dois critérios já referidos para aterros, conforme a expansibilidade for maior ou menor que 10%.

Se o torrão não se desfaz completamente, é porque tem alguma petrificação e determinar-se-á nesse caso o limite de absorção W'_A , em pastilhas talhadas numa amostra intacta, e W_o . No caso da expressão $W'_A \leq A W_o + B$ se verificar, a petrificação existente deverá ser satisfatória, mas necessita-se ainda de mais estudos experimentais para a determinação de A e B . Se W'_A não satisfizer à referida condição é porque o solo é relativamente expansivo e a sua petrificação é insuficiente para limitar a respectiva expansibilidade. Nesse caso o solo não tem coesão suficiente para resistir à erosão e, tratando-se de um talude de escavação, terá de ser encarada outra solução para o problema.

Note-se que os dois primeiros critérios são válidos tanto para taludes de escavação como de aterro, visto que nem a granulometria nem a coesão não pétrea dos terrenos são afectadas significativamente pelas operações de escavação, de transporte e de compactação. Já o mesmo não sucede com o critério baseado na petrificação, que é apenas válido para taludes de escavação, pois que só nestes a respectiva coesão pétrea poderá subsistir. Com efeito, a escavação, o transporte e a compactação do terreno para a construção de taludes de aterro destroem a respectiva coesão pétrea e tira portanto sentido ao critério que nela se baseia.

Os valores numéricos apresentados anteriormente devem encarar-se apenas como uma sugestão preliminar de critério de escolha e, sendo baseados nas condições geo-climáticas de Portugal Continental, não devem extrapolar-se a outros terrenos e a outros climas embora a metodologia a seguir continue, segundo se pensa, aplicável. É evidente o interesse de promover estudos para verificar a validade dos limites sugeridos e para definição dos valores correspondentes para outras regiões geo-climáticas.

CONCLUSÕES

Do exposto parece poder concluir-se o seguinte:

a) Na formulação geotécnica do problema da erosão de taludes considera-se o conceito de força de arrastamento, utilizado em engenharia hidráulica no escoamento de canais, extensível ao escoamento superficial em taludes e generaliza-se a lei de Coulomb à resistência ao corte de terrenos submetidos a esse escoamento.

b) Os principais parâmetros que condicionam a resistência dos terrenos à erosão são a granulometria, a expansibilidade e a petrificação.

c) A metodologia a seguir na escolha de terrenos resistentes à erosão deve pois apoiar-se na quantificação dessas características, tendo em consideração que no caso dos solos incoerentes o parâmetro fundamental é a granulometria e no caso dos solos coerentes a expansibilidade ou, em taludes de escavação, a petrificação.

d) O apuramento de valores limites para estes parâmetros que permitam estabelecer especificações para solos resistentes à erosão torna necessário realizar estudos sistemáticos em taludes típicos e nas principais regiões geo-climáticas, complementados com estudos de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – NASCIMENTO, Ú., “Estudo da regularização e protecção das barrocas de Luanda”, LNEC. Public. N.º 30, Lisboa, 1952.
- 2 – SANTOS, P. P. and CASTRO, E. de, “Soil Erosion in Roads”, 6th Int. Conf. Soil Mech., Montreal, 1965. Memória N.º 282, LNEC, 1966.
- 3 – SANTOS, P. P. e CASTRO, E. de, “Estudo das Soluções mais Convenientes para Problemas de Erosão Continental”, “3.º Relatório, LNEC, Lisboa, Fevereiro de 1966.
- 4 – SANTOS P. P. e CASTRO, E. de, “Estudo das Soluções mais Convenientes para Problemas de Erosão Continental”, “4.º Relatório, LNEC, Lisboa, Junho de 1967.
- 5 – SANTOS, P. P. e CASTRO, E. de, “Estudos sobre Erosão em Taludes de Estradas”, 2.ªs Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil, Rio de Janeiro – S. Paulo, Agosto de 1967.
- 6 – CASTRO, E. de, “Soil Swelling Test”, Proc. Third Regional Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Eng., Salisbury, 1963, Vol. 2. LNEC, Memória 235, Lisboa, 1964.
- 7 – NASCIMENTO, Ú., CASTRO, E. de e BRANCO, F., “Identification of Petrification in Soils”, 6th Int. Conf. Soil Mech., Montreal, 1965. LNEC, Memória n.º 281, 1966.
- 8 – NASCIMENTO, Ú., CASTRO, E. de e RODRIGUES, M., “Swelling and Petrification of Lateritic Soils”, Proc. Third Reg. Conf. for Africa on Soil Mechanics and Found. Eng., Salisbury, 1963, Vol. 2, p. 102. LNEC, Tech. Pap. N.º 215, 1964.

- 9 - NASCIMENTO, Ú., "Simpósio sobre Estabilidade e Consolidação de Taludes", 2.^{as} Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil, Rio de Janeiro-S. Paulo, 1967.
- 10 - LANE, E. W., "Progress Report on Studies on the Design of Stable Channels by the Bureau of Reclamation", Proc. ASCE, Sep. 1953.
- 11 - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Laboratório de Engenharia de Angola, Laboratório de Engenharia de Moçambique, "As Laterites do Ultramar Português", LNEC, Memória N.º 141, Lisboa, 1959.
- 12 - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Laboratório de Engenharia de Angola, Laboratório de Engenharia de Moçambique e Junta Autónoma de Estradas de Angola, "Portuguese Studies on Engineering Properties of Lateritic Soils", VII Int. Conf. on Soil Mec. and Found. Engineering, México, 1969.
- 13 - SANTOS, P. P., "A New Soil Constant and Its Applications", Proc. Third Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. I, 1953.