

ARTIGOS

INÍCIO DE MOVIMENTAÇÃO DE SOLOS NÃO-COESIVOS EM CANAIS

*Carlos Pereira de Novaes**
*Antonio Marozzi Riguetto***

RESUMO - *Este trabalho apresenta um estudo do início de movimentação de solos não-coesivos em canais, de importância para projetos de canais de irrigação onde a erosão deve ser evitada ou minimizada. É parte integrante do mesmo a revisão de algumas teorias sobre o assunto e a análise de dados colhidos de pesquisa experimental.*

ABSTRACT - *This work studies the threshold of the non-coesive soil particles in channels, an important tool for designing irrigation channels. The work contains a review of some theories proposed for studying the phenomenon and the analysis of some of them, through data collected in an experimental research.*

1 INTRODUÇÃO

O início de movimentação das partículas do solo de canais erodíveis tem sido estudado durante décadas, em função da construção de canais de irrigação, onde a erosão deve ser evitada ou minimizada.

Em termos metodológicos, durante muito tempo, o assunto foi estudado, levando-se em consideração a velocidade média permissível, para evitar o arrasto do material do canal (ASCE, 1975).

Os pesquisadores modernos abandonaram o conceito tradicional de velocidade crítica e passaram a utilizar o conceito de tensão de cisalhamento crítica no leito do canal, cuja abordagem pioneira foi realizada por SHIELDS (1936), estudando o fenômeno através de análise dimensional.

Quando se tem um canal cujo leito é formado por solo não-coesivo, o fluido em movimento exerce uma determinada força sobre o sedimento, provocando a tensão de atrito, que tende a deslocá-lo de sua posição de repouso. As forças que

(*) Prof. Adjunto do Departamento de Tecnologia

(**) Prof. Assistente e Doutor da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Hidráulica e Saneamento.

reagem à movimentação, por outro lado, dependem do tamanho do grão do sedimento (sua distribuição granulométrica), do seu peso específico e da declividade do canal.

Quando a tensão sobre o grão atinge a condição de provocar o seu deslocamento ou a sua movimentação (iminência de movimentação), diz-se que o escoamento é crítico ou a tensão gerada pelo escoamento é crítica (HENDERSON, 1966).

Experiências realizadas em laboratórios têm demonstrado que a movimentação do grão é um fenômeno altamente mal distribuído na superfície do solo, em termos tanto espacial como temporal, podendo um certo escoamento, sob condição crítica, ter uma área de amostra do leito totalmente em estado de repouso e, de repente, um grão ou grupo de grãos se deslocar em qualquer ponto; essa constatação leva à conclusão de que o fenômeno é de natureza estatística (SHIELDS, 1936), e permite supor que não existe verdadeiramente uma condição bem definida de início de movimentação de sedimento no leito.

É importante notar a crítica que PAINTAL (1971) faz a respeito da definição de início de movimentação.

“O movimento de sedimentos para pequenos valores de tensões de cisalhamento parece ser aleatório em termos de espaço e tempo. Parece não haver um limite inferior de tensão em que não ocorre movimentação de sedimento. Todavia, a constatação deste fato exige observações de longa duração, pois a probabilidade da movimentação tende a zero, sem, contudo, ser igual a zero, a não ser em água parada”.

Pretende-se apresentar, neste trabalho, o estudo experimental realizado sobre o início de movimentação de partículas do leito em canaletas circulares.

2 REVISÃO DE LITERATURA

SHIELDS (1936) estudou o início de movimentação de partículas através de análise dimensional onde foram analisados os parâmetros referentes à tensão de cisalhamento τ_0 , massas específicas do sedimento e do fluido ρ_s e ρ_f , diâmetro médio de amostra do solo d_{50} , aceleração de gravidade g e viscosidade dinâmica do fluido μ .

Através do teorema dos π de BUCKINGHAM, SHIELDS obteve que ψ , o termo que caracteriza o início de movimentação, é função do número de Reynolds característico (R^*_e). Simulações experimentais do início de movimentação permitiram a obtenção da relação funcional apresentada na figura 1.

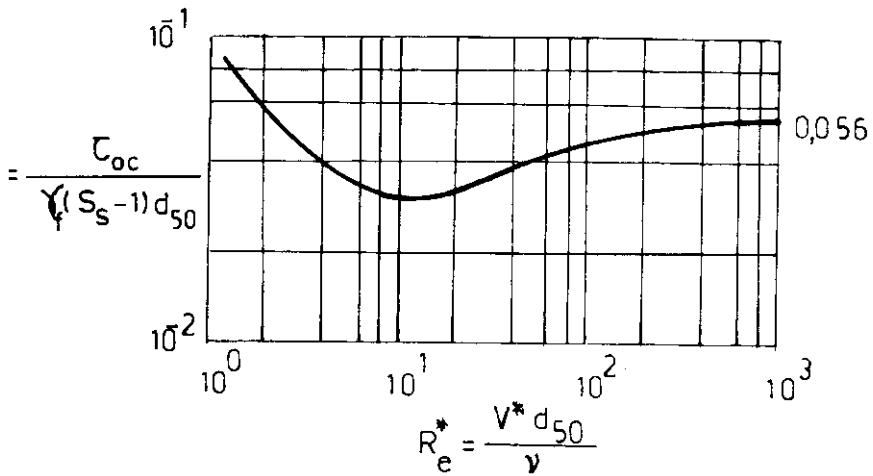


Fig.1 - Curva obtida por Shields.

A figura 1 mostra três regiões distintas de escoamento: para R_e^* menor que 6, o regime é laminar; para R_e^* entre 6 e 300, o regime é de transição; e para R_e^* maior que 300, o regime é francamente turbulento, e ψ passa a ser constante e igual 0,056.

LANE (1955) estudou o início de movimentação em canais utilizados para irrigação no Colorado (EUA), cujo peso específico médio do solo era de 2,560 kgf/m^3 .

O pesquisador recomenda, para fins de projeto, o valor da tensão de cisalhamento determinada pela equação 1, para d_{75} maior que 6mm.

$$\tau_{oc} = 0,080 d_{75} \quad (1)$$

THE TASK COMMITTEE ON PREPARATION OF SEDIMENTATION MANUAL (1966) argumenta que os resultados observados por LANE, para sedimentos grossos (eq. 1), se aproximam bastante dos resultados observados por SHIELDS ($\psi = 0,056$). Para solos mais finos, verificou-se que os resultados observados por LANE, para a tensão de cisalhamento, são 1,5 a 10 vezes maiores que os encontrados por SHIELDS para uma faixa granulométrica de 0,1mm a 6 mm; provavelmente, nesses canais, estava ocorrendo movimentação e carreamento do sedimento.

PANTAL (1971) estudou a descarga de sedimentos em escoamentos sob condições críticas e verificou que a descarga de sedimentos por unidade de largura do canal pode ser calculada através da equação 2.

$$\frac{q_s p_f^{1/2}}{d_{50} Y_f [(Y_s - Y_f) d_{50}]^{1/2}} = 6,56 \times 10^8 \left[\frac{\tau_{oc}}{Y_f (S_s - 1) d_{50}} \right]^{16} \quad (2)$$

TAYLOR E VANONI (1972) verificaram que a curva descrita por SHIELDS, na verdade, não representa o limite no qual a descarga de sedimentos é igual a zero.

A figura 2 mostra os resultados dos pesquisadores junto à curva proposta por SHIELDS. Nas diversas curvas descritas pelo termo adimensional, $(q_s / V^* d_{50}), q_s$ é a descarga de sedimentos por unidade de largura do canal.

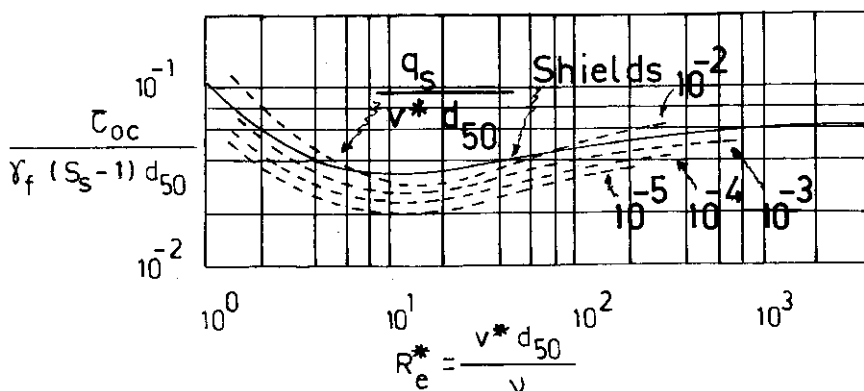


Fig. 2 - Curvas obtidas por Taylor e Vanoni.

MANTZ (1977) estudou o início de movimentação de solo não-coesivo, utilizando materiais finos ($10 \mu < d_{50} < 150 \mu$).

Como o material é de pequena granulometria e tende a ser coesivo, o pesquisador adotou uma metodologia própria, para evitar que o material se tornasse coesivo, através de processo eletrolítico e de correção do pH da água.

Como a lâmina líquida necessária para a movimentação do material é pequena, o pesquisador define a tensão de cisalhamento em função da altura da lâmina líquida, ou seja: $V^* = \sqrt{g Y_a S_0}$.

MANTZ sugere, junto aos resultados obtidos por WHITE (1970), que, para R^*e menores que 1, o início de movimentação pode ser descrito pela fórmula:

$$\frac{Y_A S_0}{(S_S - 1) d_{50}} = 0,10 \left(\frac{V^* d_{50}}{v} \right)^{-0,3} \quad (3)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO MÓDULO EXPERIMENTAL E DOS PROCESSOS DE MEDIÇÕES

Os experimentos foram realizados em uma região pré-fixada de um modelo físico de um coletor de PVC – 200mm, de 30 metros de comprimento e apoiado em uma estrutura que permitiu a modificação de sua declividade em oito posições diferentes (NOVAES, 1984).

A região de ensaios, com quatro metros de comprimento, foi construída, abrindo-se o coletor na sua parte superior e forçando sua estrutura, para evitar mudanças na secção transversal original.

O fornecimento de água ao modelo foi efetuado através de reservatório elevado com nível constante, garantindo uma vazão constante durante os ensaios.

Foi construído, na região de ensaios, um sistema estrutural de apoio a dois trilhos paralelos, cuja finalidade era de orientar a movimentação de um carro para medição da altura da lâmina de solo assentada no coletor e da lâmina líquida durante os experimentos. Esse sistema estrutural era calibrado à cada mudança de declividade do coletor, de modo a manter os trilhos na mesma declividade do coletor e horizontal no plano da secção transversal.

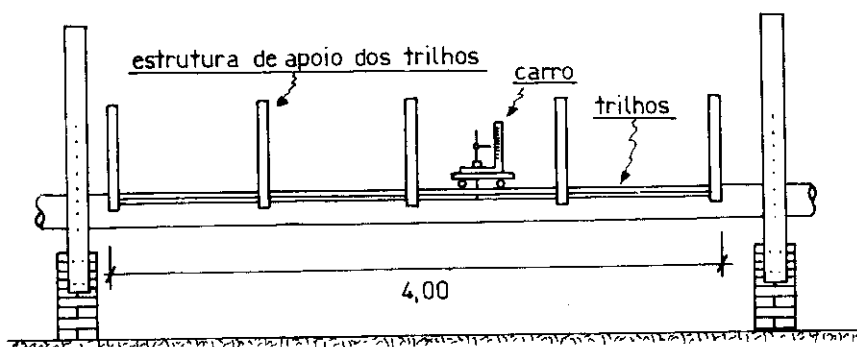


Fig.3 - Vista lateral da região de ensaios.

A leitura dos níveis das diversas alturas medidas nos ensaios foi efetuada com um limnômetro instalado no carro, que era zerado à cada mudança de declividade, em relação ao fundo do coletor.

Uma outra finalidade do carro foi a de nivelar a lâmina do solo utilizada nos ensaios, com o auxílio de um sistema de rodo de altura ajustável, como mostra a figura 4.

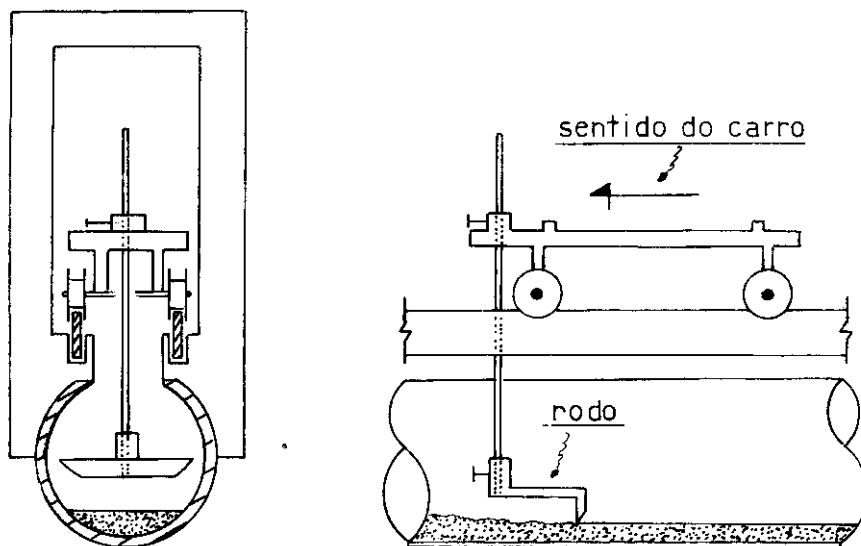


Fig. 4 - Sistema de rodo para o nivelamento da lâmina de solo e estrutura de apoio dos trilhos.

A temperatura da água não foi controlada durante os ensaios, sendo a medida da temperatura feita no decorrer dos mesmos e a viscosidade cinemática retirada de tabelas.

Todos os parâmetros referentes aos solos (curva granulométrica e peso específico real) foram determinados no laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

A pesquisa foi realizada no laboratório de hidráulica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Escola de Engenharia de São Carlos (CRHEA-USP).

3.2 METODOLOGIA UTILIZADA PARA A VERIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO INÍCIO DE MOVIMENTAÇÃO DE SOLOS NÃO-COESIVOS

Após colocar-se a amostra nivelada de solo na caneleta, em um comprimento aproximado de quatro metros, media-se a altura da lâmina de solo e, em seguida, submetia-se a amostra a diversas vazões que cresciam gradativamente, desde zero, no início de ensaio, até a vazão que dava início à movimentação das partículas do solo.

A figura 5 mostra o esquema do posicionamento da lâmina do solo submetida ao escoamento, com o anteparo colocado à jusante da região de ensaio, e a indicação das diversas alturas relativas ao escoamento, ou seja: Y_S , é a altura da lâmina do solo, Y_A , a lâmina de água e ($Y_t = Y_A + Y_S$), a lâmina total.

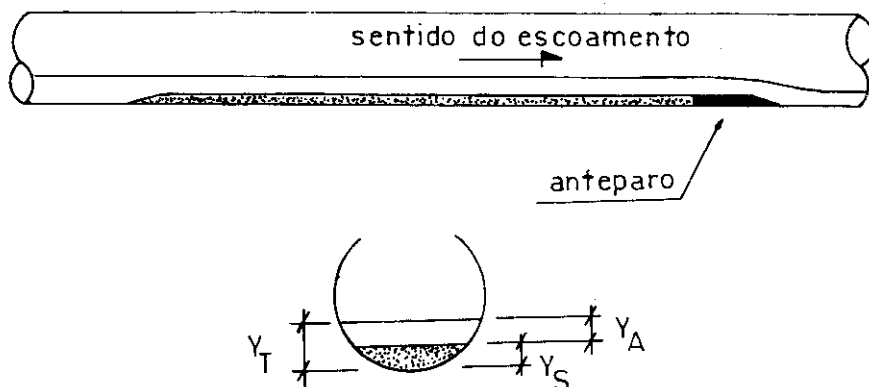


Fig.5 - Ilustração do escoamento na região de ensaios.

O início de movimentação foi definido como qualquer movimentação do sedimento que resultasse em translação, por menos que ele fosse, na superfície do solo, detectada visualmente.

A partir desse ponto, media-se a altura total da lâmina de água e solo (Y_t) e através de subtração da lâmina de solo (Y_S), obtinha-se o valor da lâmina de água para a quantificação dos diversos parâmetros do escoamento, como: a área molhada, o perímetro molhado e o raio hidráulico. A declividade do coletor e os parâmetros relativos ao solo eram previamente conhecidos.

A altura média da lâmina do solo (Y_S) foi definida através da média aritmética de 78 pontos, como mostra a figura 6, sendo que, nos solos de pequena granulometria, tomaram-se apenas 13 pontos em linha reta, na seção central, devido ao fato de não haver um relevo representativo, como acontece com os solos de grande granulometria (diâmetro médio maior que 5mm).

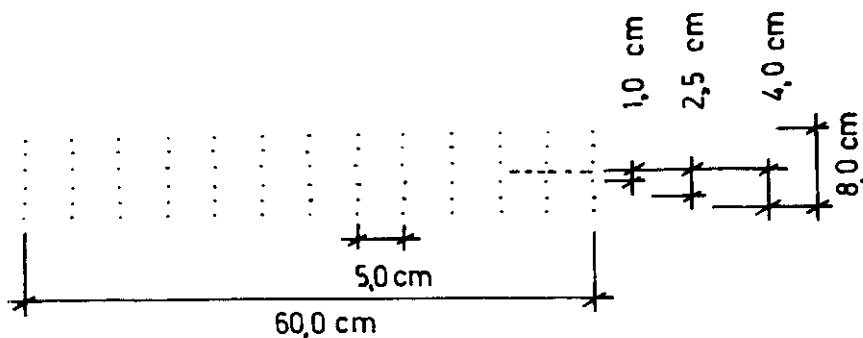


Fig. 6 - Ilustração dos pontos medidos na região de ensaios para determinação da altura média do solo (Y_S).

A quantificação do início de movimentação foi feita através dos parâmetros adimensionais utilizados por SHIELDS (1936).

$$\Psi = \frac{\tau_{oc}}{Y_f (S_s - 1) d_{50}} = \frac{R S_o}{(S_s - 1) d_{50}} = G \left(\frac{V^* d_{50}}{\nu} \right) \quad (4)$$

3.3 SOLOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Foram utilizados, nos ensaios, 7 tipos de solos, cujas características são mostradas no quadro 1 e na figura 7.

Quadro 1 - Solos utilizados.

solo	tipo	diâmetro médio d_{50} (mm)	coeficiente de uniformidade $C_u = d_{60}/d_{10}$	peso específico Kgf/m ³
3	areia média	0,62	1,44	2675
4	areia fina	0,15	1,33	2667
5	areia média	0,34	1,50	2667
6	basalto(angular)	5,20	1,41	2936
7	pedregulho arredondado	9,80	1,22	2660
8	areia grossa	1,90	1,33	2650
9	milho quebrado	1,40	1,25	1468

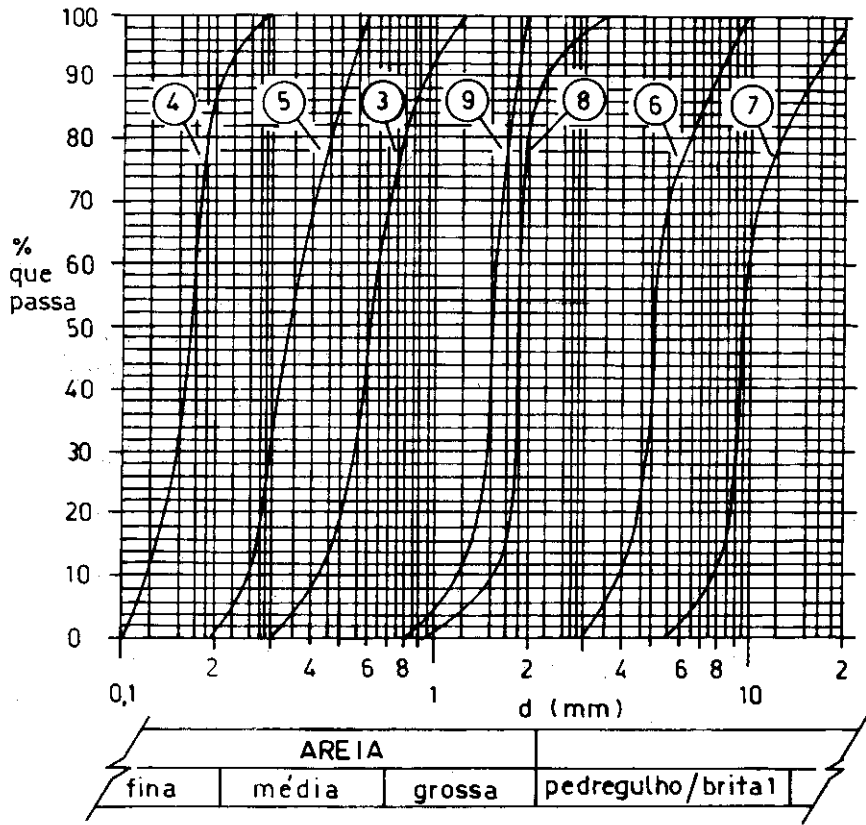


Fig. 7 - Curvas granulométricas dos solos utilizados.

4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Foram realizados vinte ensaios, cujos resultados são mostrados na figura 8, junto à curva obtida por SHIELDS, e no quadro 2 (NOVAES, 1984).

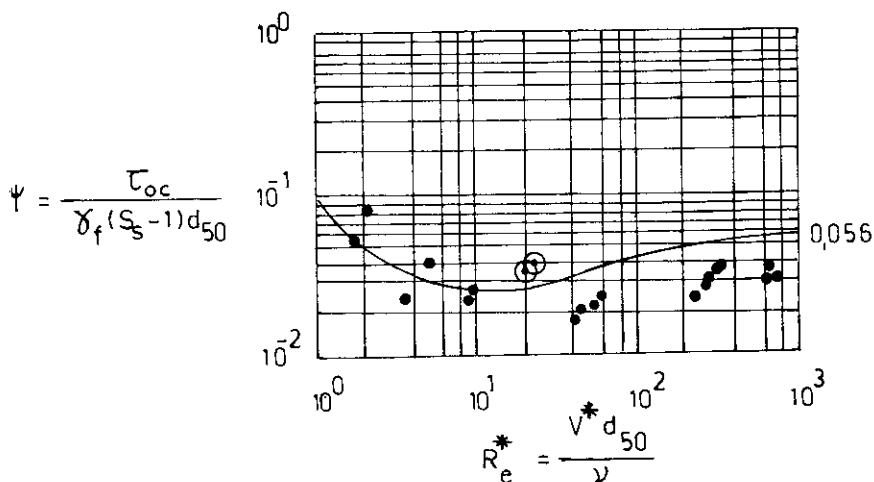


Fig. 8 - Resultados obtidos.

Os resultados obtidos com solos finos ($R_e^* < 10$) coincidem com a curva proposta por SHIELDS.

Na região de transição ($10 < R_e^* < 300$), os valores de ψ caem abaixo da curva proposta por SHIELDS.

Para solos grossos ($R_e^* > 300$), ψ passa a assumir um comportamento constante valendo 0,03, portanto, 46% menor que o resultado obtido por SHIELDS ($\psi = 0,056$).

Verificou-se, também, que os resultados obtidos para solos grossos ($R_e^* > 300$), foram menores que os resultados de TAYLOR E VANONI, para uma descarga de sedimentos representada pelo termo adimensional ($Q_S / V^* d_{50} = 10^{-5}$), onde ψ vale aproximadamente 0,04 (fig.2).

Segundo a curva obtida por PAINTAL (equação 2), a adoção de ψ igual a 0,03 resultou em uma descarga de sedimentos igual a:

$$\frac{q_s \rho_f^{1/2}}{d_{50} \gamma_f [(Y_s - Y_f) d_{50}]^{1/2}} = 2,82 \times 10^{-6} \quad (5)$$

Admitindo-se Y_s igual a 2650 Kgf/m^3 (areias em geral) e diâmetros maiores que 6mm , valores no qual ψ passa a ser constante, admitindo-se Y_f igual a 1000 Kgf/m^3 e g igual a $9,8 \text{ m/s}^2$, tem-se:

$$q_s = 0,03 d_{50}^{3/2} \quad (6)$$

Onde q_s é a descarga específica de sedimentos em (Kgf /s.m) e d_{50} em (m) , ou:

$$q_s = 1,13 \cdot 10^{-5} d_{50}^{3/2} \quad (7)$$

Onde q_s $(\text{m}^3/\text{s.m})$ e d_{50} em (m)

Os dois pontos assinalados com círculos, na figura 8, correspondem aos ensaios feitos com milho quebrado. Observou-se, no entanto, que a utilização de cereais para simulação do início de movimentação não é adequada, por dois motivos básicos: o cereal é propenso a absorver água durante os ensaios e modificar, pois, o peso específico original; o cereal não apresenta boa homogeneidade em termos de peso específico, bastando que alguns grãos na amostra tenham larvas no seu interior, o que nem sempre é fácil de se identificar, e a homogeneidade dos grãos deixa de existir, mascarando os resultados.

LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS

- Cu – Coeficiente de uniformidade
- d – diâmetro da partícula de solo
- d_a – diâmetros relativos às percentagens “a” em peso total de todas as partículas menores que ele (percentagens acumuladas que passam), ex. d_{50} = diâmetro médio.
- g – aceleração da gravidade
- G – função ou designação da função
- Q – vazão escoada
- q_s – descarga de sedimentos por unidade de largura do canal

- R – raio hidráulico do escoamento
- R_e^* – número de Reynolds relativo à velocidade de atrito
- S_o – declividade do canal
- S_s – densidade do sedimento
- V^* – velocidade do atrito
- Y_a – altura da lâmina d'água
- Y_s – altura da lâmina do solo
- Y_t – altura da lâmina total ($Y_s + Y_a$)
- γ_f – peso específico do fluido
- γ_s – peso específico do sedimento
- μ – viscosidade dinâmica do fluido
- ν – viscosidade cinemática do fluido
- ρ_f – massa específica do fluido
- ρ_s – massa específica do sedimento
- τ_{oc} – tensão de atrito crítica do fundo do canal
- Ψ – parâmetro referente à função que caracteriza o atrito ou o início de movimentação

QUADRO 2 - INÍCIO DE MOVIMENTAÇÃO DE SOLOS NÃO-COESIVOS

TESTE	SOLO	S _O (m/m)	Y (A+S) (m)	Y _S (m)	Y _A (m)	R (m)	$V^* = \sqrt{g R S_0}$ (m/s)
1	3	0,003691	0,0175	0,0090	0,0085	0,0072	0,0161
2	3	0,007231	0,0140	0,0105	0,0035	0,0032	0,0150
3	4	0,003691	0,0170	0,0100	0,0070	0,0061	0,0148
4	4	0,007231	0,0140	0,0120	0,0020	0,0019	0,0116
5	5	0,003691	0,0140	0,0100	0,0040	0,0036	0,0115
6	5	0,007231	0,0135	0,0100	0,0035	0,0032	0,0151
7	8	0,003691	0,0350	0,0080	0,0270	0,0190	0,0262
8	8	0,007231	0,0160	0,0075	0,0085	0,0070	0,0223

TESTE	Y _s (Kgf/m ³)	S _s	50 (m)	T (°C)	$\frac{v}{x} \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	$\frac{R S_0}{(S_s - 1) d_{50}}$	$\frac{V^* d_{50}}{v}$
1	2675	2,67	0,00062	18,8	1,04	0,0260	9,60
2	2675	2,67	0,00062	18,8	1,04	0,0220	8,90
3	2667	2,67	0,00015	18,2	1,06	0,0900	2,10
4	2667	2,67	0,00015	18,8	1,04	0,0550	1,70
5	2667	2,67	0,00034	18,2	1,06	0,0230	3,70
6	2667	2,67	0,00034	21,0	0,99	0,0410	5,20
7	2650	2,65	0,00190	22,8	0,95	0,0220	52
8	2650	2,65	0,00190	19,0	1,04	0,0160	40

QUADRO 2 – INÍCIO DE MOVIMENTAÇÃO DE SOLOS NÃO-COESIVOS

TESTE	SOLO	S _o (m/m)	Y (A+S) (m)	Y _S (m)	Y _A (m)	R (m)	V* = √g R S _o (m/s)
9	8	0,01032	0,0145	0,0075	0,0070	0,0059	0,0244
10	8	0,01416	0,0135	0,0075	0,0060	0,0052	0,0268
11	6	0,007231	0,070	0,0170	0,053	0,0344	0,0494
12	6	0,01032	0,0625	0,0170	0,0455	0,0307	0,0557
13	6	0,01416	0,0515	0,0170	0,0345	0,0248	0,0586
14	6	0,01778	0,0390	0,0170	0,0220	0,0171	0,0547
15	7	0,01778	0,0530	0,0160	0,0370	0,0260	0,0674
16	7	0,02109	0,0450	0,0160	0,0290	0,0214	0,0666

TESTE	Y _s (Kg/m ³)	S _s	d ₅₀ (m)	T (°C)	$\frac{v}{x} \times 10^{-6}$ (m ² /s)	R S _o (S s ⁻¹) d ₅₀	V* d ₅₀ v
9	2650	2,65	0,00190	19	1,04	0,0190	44
10	2650	2,65	0,00190	22,8	0,95	0,0230	54
11	2936	2,94	0,00520	20,8	0,99	0,0250	259
12	2936	2,94	0,00520	20,8	0,99	0,0310	292
13	2936	2,94	0,00520	20,8	0,99	0,0350	308
14	2936	2,94	0,00520	21	0,99	0,0300	287
15	2650	2,66	0,0098	21	0,99	0,0280	667
16	2660	2,66	0,0098	21	0,99	0,0280	659

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASCE. *Sedimentation Engineering*. EUA. Vito A. Vanoni, 1975.
- HENDERSON, F. M. *Open Channel Flow*. EUA. Macmillan series in Civil engineering, 1966.
- LANE, E. W. *Design of stable channels*. EUA. Transactions, ASCE, V. 120, p. 1234-79, 1955.
- MANTZ, P. A. *Incipient transport of Fine Grains and flakes by Fluids Extend Shields Diagram*, Journal of the Hydraulic division. EUA. ASCE, V. 103, no HY6, p. 601-15, June, 1977.
- NOVAES, Carlos Pereira de. *Estudo sobre Coeficiente de Atrito e Velocidade de arrasto de Sólidos em Canais*. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento, julho, 1984.
- PAINTAL, A.S. *Concept of critical shearstress in loose boundary open Channel*. EUA. Journal of hydraulic research, v. 9, n. 1, p. 91-114, 1971.
- SEDIMENT transport mechanics: Initiation of motion. Task committee on preparation of sedimentation Manual. EUA. ASCE. v. 92, n. HY2, p. 291-314, March, 1966.
- SHIELDS, A. *Anwendung der aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung*. (Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement), Mitteilungen der Preuss. Versuchsanst fur Wasserbau un Schiffbau, Berlin, n^o 26 (1936). Available also in a translation by W. P. Ott and J. C. van Uchelen, S. C. S. Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Calif.
- TAYLOR, B. D. & VANONI, V. A. *Temperature effects in low transport flat-bed flows*. EUA. Journal of Hydraulic Division, ASCE v. 98, n. HY8, p.1 427-45, August, 1972.
- WHITE, S. J. *Plane bed Thresholds of fine grained sediments*. EUA. Nature, v.228. p.152-3, October, 1970.