

Capítulo 160

Canais em solos coesivos conforme Akan

Capítulo 160- Canais em solos coesivos conforme Akan com tensão trativa

160.1 Introdução

Partheniades, 2009 comenta que os estudos sobre solos coesivos e datam de uns 50 a 60 anos atrás. Nos interessa o comportamento dos sedimentos coesivos em canais abertos.

O grande interesse no transporte de sólidos em canais é o estudo da erosão e deposição tendo em vista a estimativa da vida útil dos reservatórios.

160.2 Histórico

Há uma grande dificuldade em se dizer de solos coesivos, mas Partheniades, 2009 considera aquele solo que tem partículas que vão de 1 μm até 50 μm , Estas partículas estão sujeitas a forças eletroquímicas e há ação nas superfícies das partículas e na sua massa. Estas forças se devem as propriedades minerais das partículas dos sedimentos e da adsorção de íons nas superfícies das partículas.

Segundo Partheniades, 2009 os termos “finos” e sedimentos coesivos são as mesmas coisas e ambos são usados comumente.

O critério de dimensionamento usando a velocidade foi criado em 1914 por Schoklitsch e continuou a ser usado.

Foi Du Buat em 1816 quem usou o conceito de tensão de resistência em canais, mas foi Du Boys em 1879 que chamou de tensão trativa.

Mais tarde Fortier e Scobey fizeram estudos para a ASCE em 1922 e publicaram em 1926 usando o critério da velocidade.

Os Russos também estudaram os canais e continuaram com os conceitos de velocidade e de tensão trativa.

Na Índia Kennedy em 1895 criou o conceito da “Teoria do Regime” destinada a canais de irrigação criando métodos empíricos. Mais tarde Lane aperfeiçoou os estudos e os mesmos continuam a ser usados em todo o mundo principalmente quando queremos evitar a deposição de sólidos.

Estudos realizados em 1953 pelo U. S. Bureau of Reclamation revelou pequena correlação entre a tensão trativa das forças d erosão com o diâmetro médio das partículas.

Partheniades,2009 define o termo sedimentos coesivos como uma mistura de silte e argila com diâmetros menores que 50 μm e frações pequenas em torno de 1 μm com vários graus de matéria orgânica.

As propriedades mais importantes em solos coesivos são: plasticidade e coesão.

Plasticidade é a propriedade da massa da argila se deformar quando submetida a tensões sem quebrar. São usados normalmente os limites de Atteberg.

Quando um solo coesivo é submetido a tensões podemos aplicar a equação de Coulomb:

$$Sh = ch + ph \cdot \text{tang } \Phi h$$

Sendo:

Sh= a tensão

ch= é o intercepto da reta inclinada é chamado de **coesão**;

ph= é a tensão normal

Φh= é o ângulo da reta chamado de ângulo de **fricção** interna

As partículas menores que 1µm são chamadas de coloides.

Uma definição de sedimentos finos é que é uma mistura de silte e argila com pouco de areia fina e matéria orgânica exibindo propriedades coloidais e que estão entre os diâmetros de 2 µm a 74 µm sendo que a argila está abaixo de 2 µm.

160.3 Erosão solos coesivos

Conforme Partheniades, 2009 Du Buat em 1816 examinando vários tipos de solos recomendou a velocidade critica de erosão de 0,35m/s. Mais tarde em 1916 Etcheverry achou resultados de 0,825 m/s a 0,9m/s para uma media de solos e 1,20m/s a 1,5 m/s para argila rígida.

A American Society of Civil Engineers (ASCE) publicou em 1926 estudos feitos por Fortier e Scobey chegando a velocidade de 0,5m/s a 1,00m/m para areia fina 0,75m/s a 1,5m/s para argila rígida. A ASCE classifou os solos em dois: solos coesivos e não coesivos sendo o valor de velocidade mais alto em solos coesivos de argila.

Os engenheiros Russos em 1936 publicaram estudos das velocidades criticas e tensão trativa critica relativos a base dos cursos de água.

Os Russos acharam para argila rigida limites de velocidae entre 1,2m/s a 1,7m/s e os americanos em uma classificação semelhante acharam valores entre 0,9m/s a 1,5m/s conforme Tabela (160.1).

Partheniades, 2009 salienta que naquela epoca os Russos só usavam o criterio da velocidade e somente em meados do seculo XX é que começaram a usar o criterio da tensão trativa.

As teorias de Kennedy na India criou a Teoria do Regime sendo que originalmente usou para achar a velocidade critica Vc.

$$Vc = a y_o^b$$

Sendo:

Vc= velocidade critica (m/s)

y_o= altura do nivel de água (m)

a, b: coeficientes praticos.

Inicialmente Kennedy usou a= 0,84 e b=0,64. Mais tarde ele mesmo sugeriu que os valores de “a” variavam entre 0,67 a 0,23 e b entre 0,53 a 0,64.

Tabela 160-1- Velocidades e tensões criticas em canais abertos. Fonte: Partheniades, 2009 baseado nos engenherios Russos.

Índice de vazios	2,0 a 1,5		1,2 a 0,6		0,6 a 0,3		0,3 a 0,2	
	V _c	τ _c	V _c	τ _c	V _c	τ _c	V _c	τ _c
Argila arenosa com mais de 50% de argila	0,45	1,92	0,90	7,5	1,30	15,7	1,80	30,2
Argila pesadas	0,40	1,50	0,85	6,75	1,25	14,6	1,70	27,0
Argilas	0,35	3,30	0,80	5,94	1,20	13,5	1,65	25,4
Argila com baixo índice de plasticidade	0,32	0,96	0,70	4,6	1,05	10,25	1,35	17,0

Estudos do US Bureau of Reclamation de 1953 achou resistência a erosão em solos coesivos entre 20 Pa a 30 Pa sendo recomendado para canais em solos coesivos. Para canais gramados o Bureau achou valor de resistência de 60 Pa.

Foram feitas pesquisas por Smerdon e Beasley citado por Partheniades, 2009 em canais abertos em solos coesivos no que se refere ao índice de plasticidade (PI) sendo criada a seguinte equação:

$$\tau_c = 0,168 (PI)^{0,84}$$

Sendo:

PI= índice de plasticidade na faixa de 10 a 20

τ_c = tensão trativa máxima (Pa)

Infelizmente a equação em função do índice de plasticidade contém erros, pois, diferem pelo fator de 10 a 15 vezes.

Partheniades, 2009 cita varios trabalhos como o de Grissinger, Smerdon e Beasley cujos experimentos levaram ao valor de 19 Pa como tensão trativa critica para se evitar a erosão em solos coesivos.

Uma outra observação interessante de Grissinger e citada por Partheniades, 2009 é que a taxa de erosão em solos coesivos depende da temperatura. Assim na temperatura de 35 °C é aproximadamente o dobro da taxa de erosão na temperatura a 20°C.

160.4 Índice de vazio

Vamos primeiramente definir o que é índice de vazio e que é índice de plasticidade IP.

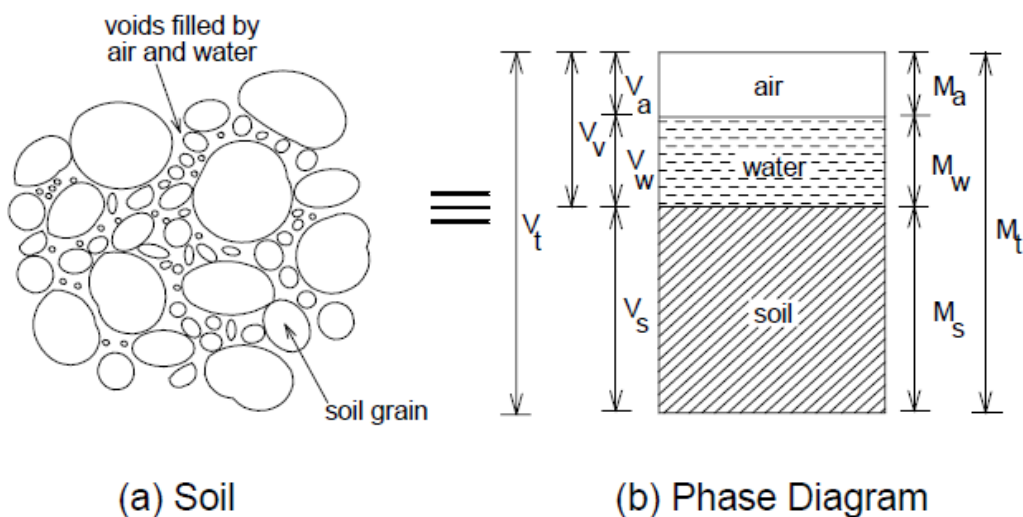


Figura 160.1. Relação das fases do solo: ar, água e solo.

O índice de vazio é definido pela letra “e” e representa o quociente:

$$e = V_v / V_s$$

Sendo:

e= void ratio (índice de vazio) que varia de 0 a 1,5

Vv= volume de vazio

Vs= volume do solo

Na Figura (160.2) podemos obter a tensão trativa permissível τ_p em N/m^2 entrando com o índice de vazios do solo coesivo.

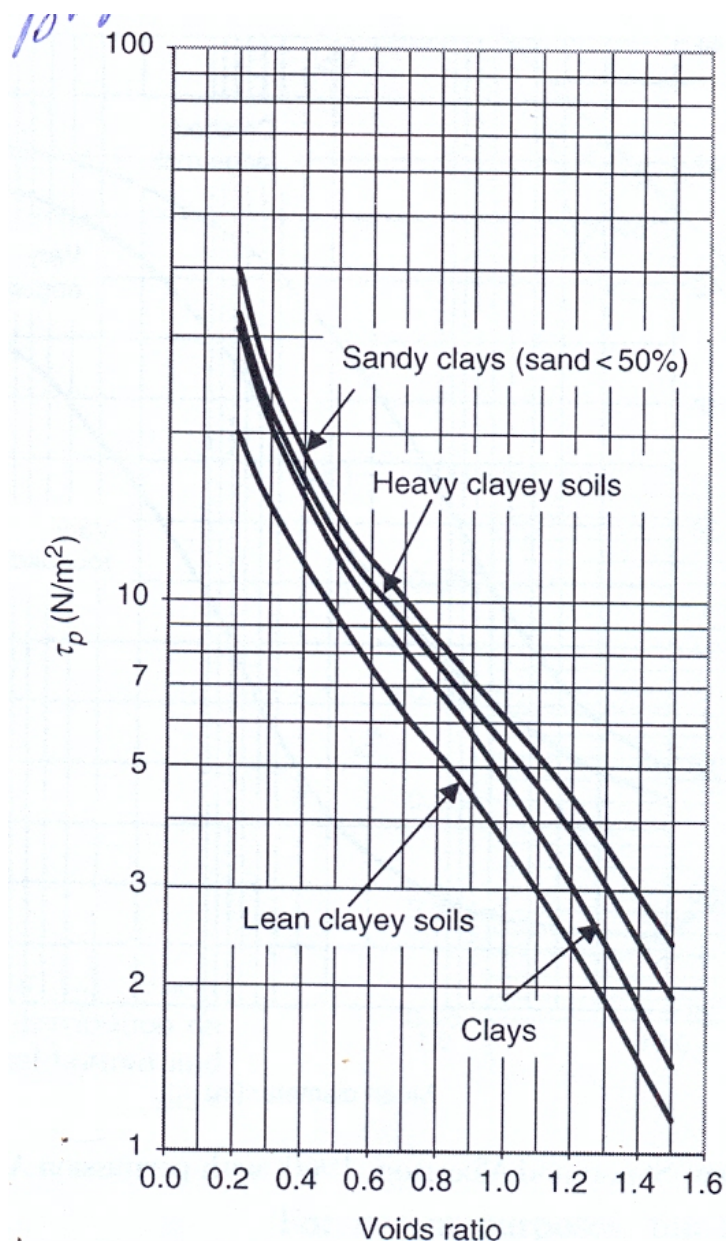


Figura 160.2- Tensão trativa permissível em função do índice de vazios para solos coesivos. Fonte: Akan, 2006

O índice de vazios varia de 0 a 1,0 para areia e de 0,3 a 1,5 para argila. Para solos argilosos orgânicos pode ser até mais que 1,5.

160.5-Índice de plasticidade IP

Define-se **plasticidade** como sendo a propriedade dos solos finos que consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados sob certas condições de umidade. Segundo a ABNT NBR 7250/82, a plasticidade é a propriedade dos solos finos, entre largos limites de umidade de se submeterem a grandes deformações permanentes, sem sofrer ruptura, fissuramento ou variação de volume apreciável.

A argila é a fração do solo cujas partículas são inferiores a 0,002mm (NBR 7250) que em contato com a água, adquire plasticidade. A argila também contém substâncias orgânicas como vegetal (húmus) e animal (microorganismos) e substâncias inorgânicas como quartzo, micas, feldspato, calcita, dolomita e hidróxidos de Fe e Al.

As argilas são mais compressíveis quando maior for o IP.

Segundo Jenkins, os solos poderão ser classificados em:

- | | |
|-------------------------|------------------|
| -fracamente plásticos | $1 < IP \leq 7$ |
| -medianamente plásticos | $7 < IP \leq 15$ |
| -altamente plásticos | $IP > 15$ |

Tabela 160.2- Índice de plasticidade para alguns solos típicos brasileiros

<i>Tipo d solos</i>	<i>IP (%)</i>
<i>Resíduos de arenito (arenosos finos)</i>	<i>11 a 20</i>
<i>Residual de gnaisse</i>	<i>20 a 25</i>
<i>Residual de basalto</i>	<i>20 a 30</i>
<i>Residual de granito</i>	<i>14 a 18</i>
<i>Argilas orgânicas de várzeas quaternárias</i>	<i>30</i>
<i>Argilas orgânicas de baixadas litorâneas</i>	<i>80</i>
<i>Argila porosa vermelha de São Paulo</i>	<i>25 a 40</i>
<i>Argilas variegadas de São Paulo</i>	<i>15 a 45</i>
<i>Areias argilosas variegadas de São Paulo</i>	<i>5 a 15</i>
<i>Argilas duras, cinzas de São Paulo</i>	<i>42</i>

Fonte: Mecânica dos Solos, Paulo César Lodi, Volume I

160.6 Dimensionamento de canal em solo coesivo conforme AKAN

Chamando a tensão trativa do fundo do canal de τ_b ela deve ser menor que a tensão trativa permissível τ_p multiplicado pelo fator de sinuosidade C_p e assim teremos:

$$\tau_b \leq C_p \cdot \tau_p$$

Mas τ_b é igual a:

$$\tau_b = \gamma \cdot y \cdot S_o$$

$$\gamma \cdot y \cdot S_o \leq C_p \cdot \tau_p$$

Tirando-se o valor de y e chamando de y_{lim} temos:

$$y_{lim} = (C_p \cdot \tau_p) / (\gamma \cdot S_o)$$

Nota: o valor de y a ser achado deverá ser menor ou igual ao y_{lim} .
O valor de K_s depende da declividade do talude m (ou z).

Na Figura (160.3) temos os valores de K_s em função do talude m (ou z);

No **talude** teremos:

$$\tau_s = K_s \cdot \gamma \cdot y \cdot S_o \leq \tau_p, K_s, C_p$$

No **fundo** do canal:

$$\tau_b = \gamma \cdot y \cdot S_o \leq C_p \cdot \tau_p$$

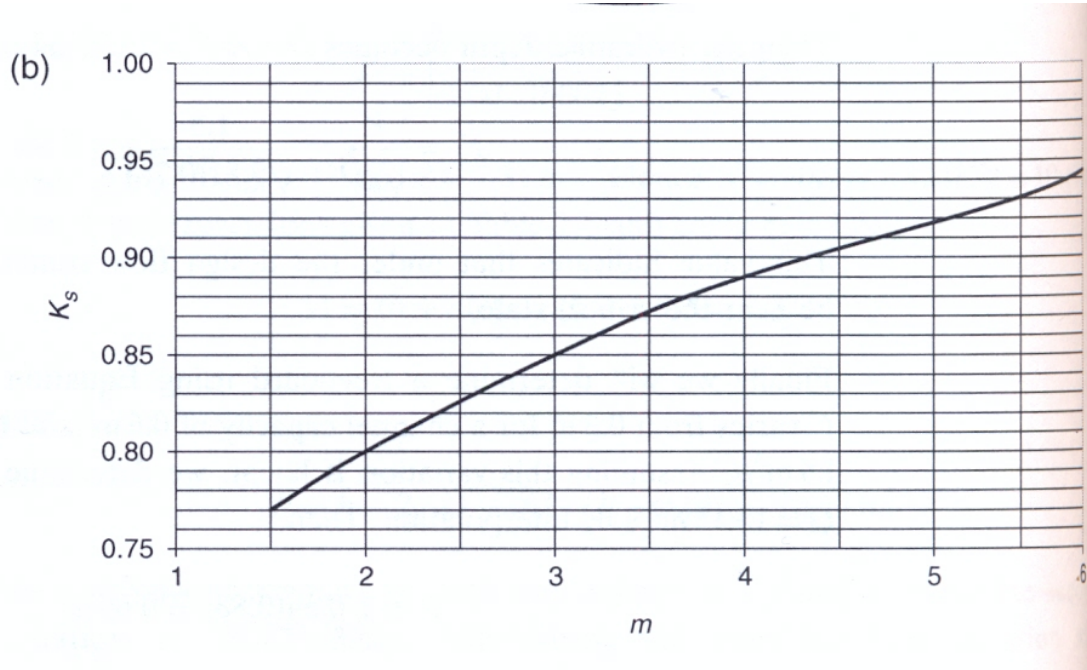


Figura 160.3-Valores de K_s do talude em função da declividade do talude m (ou z) para solos não coesivos.
Fonte: Akan, 1986

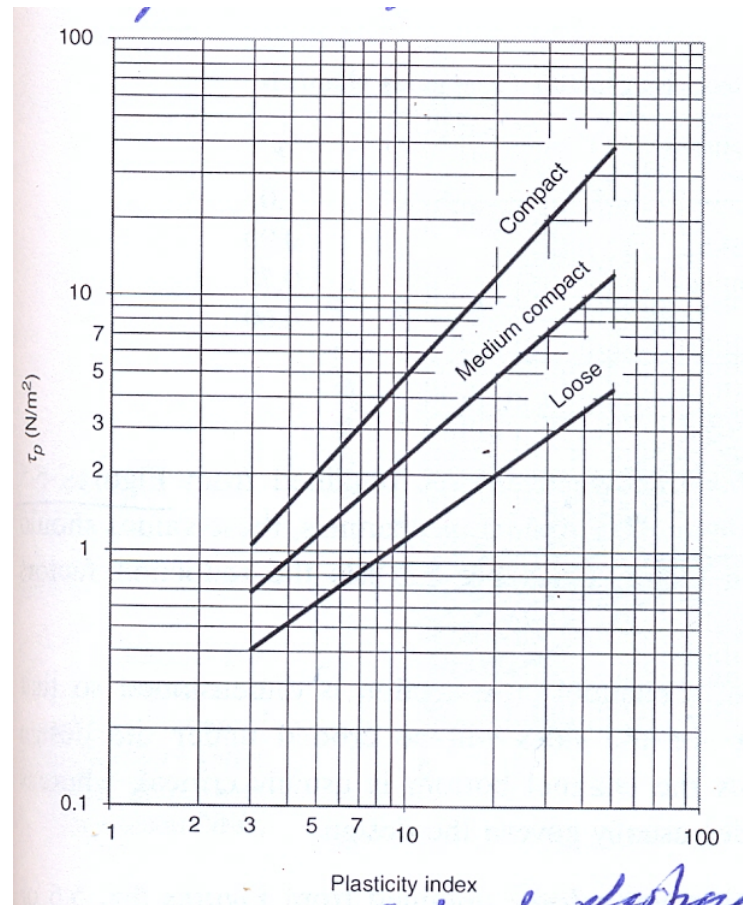


Figura 160.4- Tensão trativa permissível em função do índice de plasticidade (IP) para solos coesivos

Fonte: Akan, 2006

160.7 DAEE

O Departamento de Aguas e Energia do Estado de São Paulo adota os coeficientes de Manning e velocidades máximas conforme Figura (160.1).

Tabela 160.3- Rugosidade n e velocidades máximas conforme DAEE SP

DAEE pequenas Barragens, 2005
Instrução DPO 002/2007

Tipo de superfície ou de revestimento	n
Terra	0,035
Gramma	
Rachão	
Gabião	0,028
Pedra argamassada	0,025
Aço corrugado	0,024
Concreto	0,018

Revestimento	Vmax (m/s)
Terra	1,5
Gabião	2,5
Pedra argamassada	3,0
Concreto	4,0

160.8 Limitações de velocidades máximas em canais

Para canais as máximas velocidades permissíveis conforme Ven Te Chow são:

Tabela 160.4–Velocidades máximas permissíveis em canais sem revestimento (canais erodíveis com declividades pequenas)

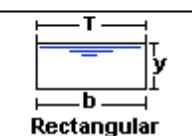

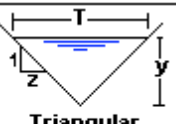
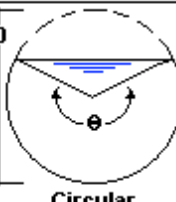
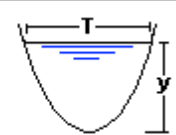
Material	Coefficiente “n” de Manning	Água Limpa (m/s)	Água com siltes coloidais (m/s)
Areia fina coloidal	0,020	0,46	0,76

Argilo-arenoso, não coloidal	0,020	0,53	0,76
Argilo-siltoso, não coloidal	0,020	0,61	0,91
Siltes aluvionais, não coloidais	0,020	0,61	1,07
Argiloso comum firme	0,020	0,76	1,07
Argila densa, muito coloidal	0,025	1,14	1,52
Siltes aluvionares; coloidais	0,025	1,14	1,52
Xistos e rochas estratificadas	0,025	1,83	1,83
Cascalho fino	0,020	0,76	1,52
Argila estabilizada com cascalho quando não coloidal	0,030	1,14	1,52
Silte estabilizado com cascalho quando coloidal	0,030	1,14	1,52
Cascalho grosso, não coloidal	0,025	1,22	1,83
Seixos e pedras soltas	0,035	1,52	1,68

Fonte: Ven Te Chow, Open Channel Hydraulics in Drenagem e Controle de Erosão Urbana, Fendrich et al, 1997

160.9 Elementos geométricos de varias seções de canais

Tabela 160.5- Elementos geométricos das varias seções de canais

Tipo de sección	Área A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 <p>Rectangular</p>	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 <p>Trapezoidal</p>	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b + 2zy$
 <p>Triangular</p>	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 <p>Circular</p>	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$\frac{(\text{sen}\frac{\theta}{2})D}{2}$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
 <p>Parabólica</p>	$\frac{2}{3} Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Exemplo 160.1- Dimensionamento de canais em solos coesivos segundo modelo de AKAN, 2010.

Dimensionar um canal trapezoidal moderadamente sinuoso que será escavado em uma argila com *void ratio* 0,3 (índice de vazios). O canal terá declividade $S_o=0,0016\text{m/m}$ e conduzirá a vazão $Q=9,5\text{m}^3/\text{s}$.

Nota: a argila é a fração do solo cujas partículas são inferiores a 0,002mm (NBR 7250) que em contato com a água, adquire plasticidade. A argila também contém substâncias orgânicas como vegetal (húmus) e animal (microorganismos) e substâncias inorgânicas como quartzo, micas, feldspato, calcita, dolomita e hidróxidos de Fe e Al.

Primeiro passo

Adotamos:
 $n= 0,020$

Segundo passo

Adotamos para o talude $m=1,5$ talude 1V: 1,5H Tabela (160.6)

Tabela 160.6-Declividades do talude conforme tipo de material

Material	Declividade do Talude (zH: 1 V)
Rocha	Praticamente vertical
Argila rija	$\frac{1}{2} : 1$ até 1:1
Solo firme	1:1
Solo arenoso solto	2:1
Solo arenoso margoso	3:1

Fonte: Open-Channel Flow, Chraudry,1993 p. 238

Terceiro passo

Valor K_s tirado do gráfico da Figura (160.5).

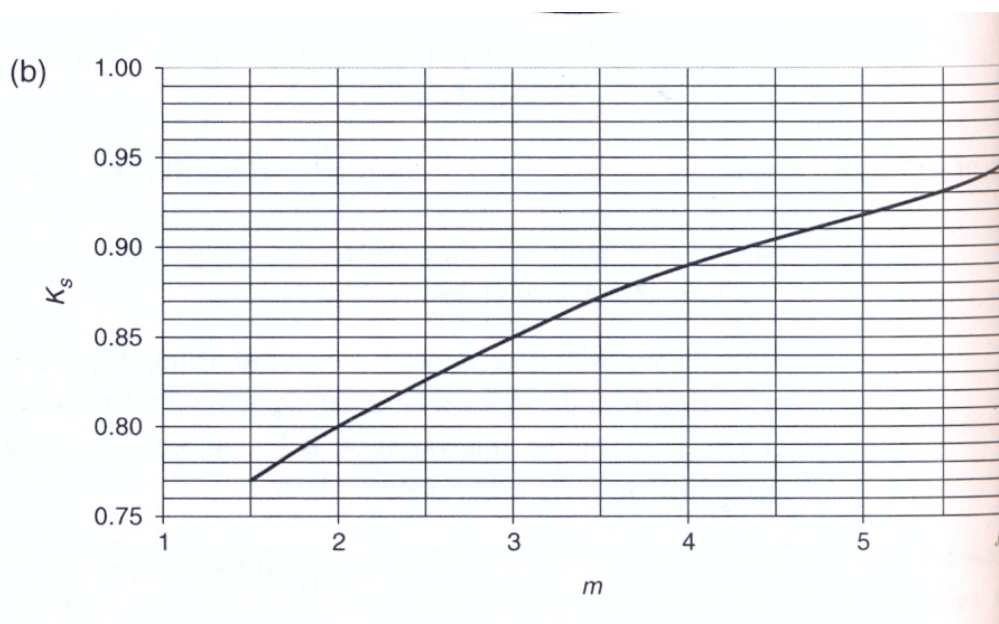


Figura 160.5-Valores de K_s do talude em função da declividade do talude m (ou z) referente a distribuição de tensões no fundo e nos taludes. Fonte: Akan, 1986

Entrando no gráfico da Figura (160.5) com $m=1,5$ (talude) achamos $K_s=0,77$

Quarto passo

Sinuosidade do rio

Tabela 160.7- Fator de correção da tensão trativa crítica conforme o grau de sinuosidade do canal

Grau de sinuosidade de um canal	Fator de correção C_s
Canal em linha reta	1,00
Canal ligeiramente sinuoso	0,90
Canal moderadamente sinuoso	0,75
Canal muito sinuoso	0,60

$C_p = 0,75$ Tabela (160.7) para canal moderadamente sinuoso

Quinto passo

Escolha da tensão trativa máxima admissível.

Tendo o void ratio $=0,3$ entramos na Figura (160.3) e achamos a tensão trativa máxima admissível de 20 Pa.

Esclarecemos que uma argila dura tem void ratio entre 0,4 a 1,0 e uma argila fofa entre 0,3 a 15. Lembremos que o void ratio é para solos coesivos e não para solos não-coesivos.

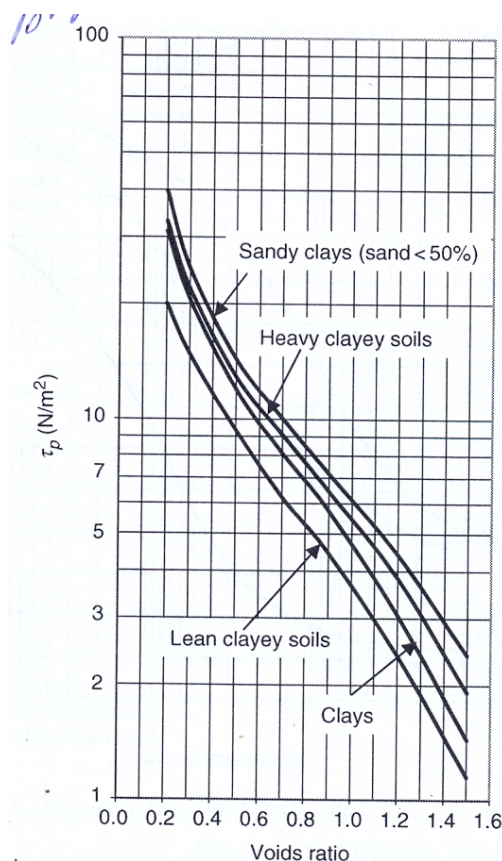


Figura 160.6- Tensão trativa permissível em função do índice de vazios (void ratio) para solos coesivos. Fonte: Akan, 2006

Entrando na Figura (160.3) com o *void ratio* igual a 0,3 achamos para a argila a tensão trativa permissível de $\tau_p=20 \text{ N/m}^2$

O void ratio varia de 0 a 1,0 para areia e de 0,3 a 1,5 para argila. Para solos argilosos orgânicos pode ser até mais que 1,5.

Esclarecemos que há outra situação em que temos uma estimativa do índice de plasticidade IP da argila.

As argilas são mais compressíveis quando maior for o IP.

Segundo Jenkins, os solos poderão ser classificados em:

- | | |
|-------------------------|------------------|
| -fracamente plásticos | $1 < IP \leq 7$ |
| -medianamente plásticos | $7 < IP \leq 15$ |
| -altamente plásticos | $IP > 15$ |

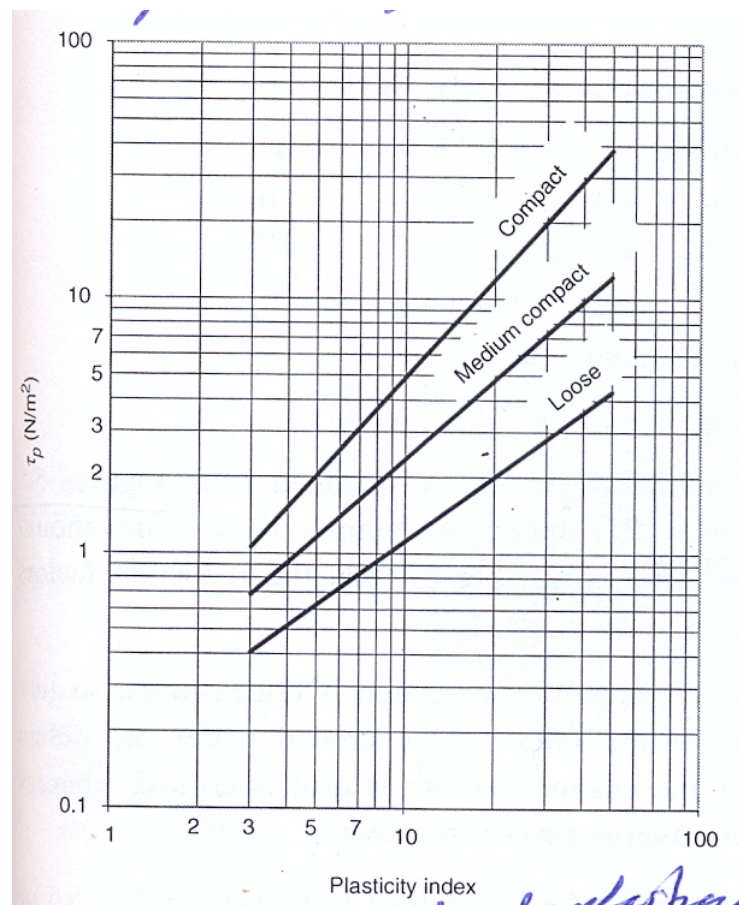


Figura 160.7- Tensão trativa permitível em função do índice de plasticidade (IP) para solos coesivos. Fonte: Akan, 2006 baseado em Chen e Cotton, 1988.

Observemos que se possuímos o índice de plasticidade IP podemos ir à Figura (160.7) e achar a tensão trativa máxima admissível.

Sexto passo.

Cálculo do y_{lim} para solo coesivo

C_p = coeficiente de sinuosidade $C_p=0,75$ tirado de tabela.

$$y_{lim} = (C_p \cdot \tau_p) / (\gamma \cdot S_o)$$

$$y_{lim} = (0,75 \times 20) / (9800 \times 0,0016) = 0,958m$$

Portanto, a altura máxima que terá o canal será de 0,958m.

Nota importante: a altura limite é 0,958m, mas poderemos ter valores menores para y .

Vamos adotar $y=0,70m$, por que então teremos velocidade $< 1,50m/s$ aconselhada para solos coesivos.

Setimo passo
Achar o valor de “b”

Tabela 160.8- Calculos para achar “b” e velocidade usando Manning

Yn	n	S	B	z	Area molh	P	R	V	Q	Espelho T
0,700	0,020	0,0016	7,96	1,5	6,55	10,48	0,62	1,46	9,58	10,1

Velocidade $V = 1,46\text{m/s} < 1,50\text{m/s}$ OK
 $b = 7.96\text{m}$

Oitavo passo

Verificação da máxima tensão trativa **no talude.**
Conforme Figura (160.24) para $m = 1,5$ achamos $K_s = 0,77$.

Mas:

$$\tau_s = K_s \cdot \gamma \cdot y \cdot S_0$$

$$15 \text{ Pa} \times K_s = 15 \times 0,77 = 11,55 \text{ Pa}$$

$$\tau_s = 0,77 \times 9790 \times 0,7 \times 0,0016 = 8,44 \text{ N/m}^2 < 11,55 \text{ N/m}^2 \text{ OK}$$

A tensão trativa no talude é 8,44 Pa que é menor que os 11,55 Pa máximo admissível no talude e portanto, não haverá erosão nos taludes do canal de solo coesivo.

Nono passo

Verificação da tensão trativa máxima no **fundo do canal.**

$$C_p \cdot \tau_p = 0,75 \times 20 = 15 \text{ N/m}^2 \quad \text{Mas no fundo do canal a tensão será maior.}$$

$$\gamma \cdot y \cdot S_0 = 9790 \times 0,7 \times 0,0016 = 10,96 \text{ N/m}^2 \leq 15 \text{ N/m}^2 \text{ e portanto o canal será estável.}$$

Decimo passo

Verificação do numero de Froude

Vamos calcular a área molhada A e a largura da superfície T.

$$A = (b + my)y = (7,96 + 1,5 \times 0,7) \times 0,70 = 6,55\text{m}^2$$

$$T = b + 2m \cdot y = 7,96 + 2 \times 1,5 \times 0,5 = 10,1\text{m}$$

$$V = Q/A = 9,5 / 6,55 = 1,46\text{m/s} < \mathbf{1,50\text{m/s para solo coesivo}}$$

$$\text{Diâmetro hidráulico } D = A/T = 6,55/10,1 = 0,648\text{m}$$

$$\text{Número de Froude } F = V / (g \cdot D)^{0,5} = 1,46 / (9,81 \times 0,648)^{0,5} = \mathbf{0,58 < 0,86 \text{ OK}}$$

Decimo primeiro passo

Freeboard (f)

$$f = (k \cdot y)^{0,5} = (1,70 \times 0,70)^{0,5} = \mathbf{1,19\text{m}}$$

Portanto, o canal de terra em argila terá seção trapezoidal com base $b = 7,96\text{m}$ altura do nível de água $0,70\text{m}$ e *freeboard* de $1,19\text{m}$. O talude será 1V: 1,5H.

160.6 Bibliografia e livros consultados

- AKAN , A. OSMAN. *Open channel hydraulics*. 1a ed. 2006, reprinted in 2008. Elsevier, 364 páginas. ISBN 978-0-7506-6857-6.
- BAPTISTA, MÁRCIO BENEDITO et al. *Hidráulica Aplicada*. ABRH, 2001, 619 páginas.
- CHAUDHRY, M. HANIF. *Open-Channel Flow*. Prentice Hall, 1993, 483páginas.
- CHIN, DAVID A. *Water Resources Engineering*. Prentice Hall, 2000, 750páginas
- CHOW, VEN TE. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, 1986, 680 páginas.
- FOX, ROBERT W. E MCDONALD, ALAN T. *Introduction to fluid mechanics*. 3a ed. 1985, John Wiley & Sons, 741páginas.
- FRENCH, RICHARD H. *Hydraulic of open channel flow*. Chapter 3 in MAYS, LARRY W. *Stormwater collection systems design handbook*, 2001.
- FRENCH, RICHARD H. *Open channel hydraulics*. Editora WRP, 638 páginas, 20076, ISBN 978-1-887201-44-5.
- GUPTA, RAM S. *Hydrology and hydraulic systems*. Waveland editora, 3a ed, ano 2008, ISBN 978-1-57766-455-0, 896 páginas.
- MCCUEN, RICHARD H. *Hydrologic analysis and design*. 2a ed. 814 páginas, 1998, ISBN 013-134958-9. Editora Prentice Hall.
- PARTHENIADES, EMMANUEL. *Cohesive Sediments in Open Channels*. Editora Esevier, 2009, 358 paginas, ISBN 978-1-85617-556-2
- SUBRAMANYA, K. *Flow in open channels*. McGraw-Hill, India,3a ed. 548p.
- VANONI, VITO A. *Sedimentation Engineering*. ASCE- American Society of Civil Engineers, USA, ISBN 0-7844-0823-8, ano 2006, 418 páginas.