

A ERODIBILIDADE DOS TERRENOS E SUA MEDIÇÃO EM ESCALA LABORATORIAL

GROUND ERODIBILITY AND ITS MEASUREMENT IN LABORATORY SCALE

Dinis da Gama, Carlos, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, dgama@ist.utl.pt*
Reis e Sousa, Manuel *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, reis.sousa@mail.ist.utl.pt*
Oliveira, José, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, josezagallo@yahoo.com*

RESUMO

A erodibilidade dos terrenos tem sido objecto de vários estudos e publicações; no entanto, as suas resistências à erosão motivada por elevada precipitação não têm sido relacionadas com as suas características físicas e mecânicas, mormente as respeitantes a granulometria e resistência ao corte. Com o objectivo de se estudar a relação do índice de resistência dos solos à erosão, devida a elevada precipitação, com a granulometria e as características de corte desses mesmos solos, foram realizados vários tipos de ensaio sobre sete amostras de solo com características bem diferentes. Neste artigo descrevem-se os ensaios efectuados, apresentam-se os resultados obtidos e tiram-se conclusões de ordem geral.

ABSTRACT

Ground erodibility has been submitted to many studies and publications; however, ground resistances to the erosion motivated by intense precipitation has not been related with its physical and mechanical characteristics, mainly those concerning to size grading and shear strength. With the purpose of studying the relation between the index of resistance of ground to erosion for increased amounts of precipitation with the size of particles and their shear strength characteristics, several types of tests were carried out on seven distinct samples of soil. In this article the performed tests are described, results are presented and generic conclusions are presented.

1. INTRODUÇÃO

A elevada precipitação de água das chuvas provoca erosão nos taludes terrosos e mesmo naqueles constituídos por rochas brandas, erosão essa que depende, fundamentalmente, das características de corte e granulometria dos materiais constituintes dos taludes, do ângulo de declive dos próprios taludes e dos caudais e velocidades da água que escoam ao longo dos mesmos. A precipitação de água, associada a fracas características coesivas dos terrenos e ao declive do talude podem motivar a sua instabilização por mecanismos de escorrimento.

As propriedades físicas e mecânicas dos materiais constituintes dos taludes são facilmente determinadas mediante ensaios em laboratório possibilitando, assim, avaliar o contributo de cada uma dessas características para o grau de estabilidade dos taludes em épocas de intensa precipitação. Porém, não tem sido estabelecida ligação entre essas propriedades geotécnicas e a resistência do solo à erosão.

Com o objectivo de se avaliar a influência que as características de corte e a dimensão média das partículas dos materiais dos taludes exercem na resistência à erosão desses mesmos materiais quando sujeitos a grande pluviosidade, foram preparados provetes de vários tipos de solo e sujeitos a análise granulométrica, a ensaios de corte e a ensaios de erodibilidade.

2. ENSAIOS E RESULTADOS

Para se estabelecer a relação entre a resistência dos terrenos à erosão, quando sujeitos a pluviosidade intensa, e a granulometria e as características de corte dos mesmos, foram efectuadas análises granulométricas de sete amostras de solo com diferentes características físicas e mecânicas e de cada uma dessas amostras foram preparados provetes para serem submetidos a ensaios de corte e a ensaios de erodibilidade. Aquelas amostras foram extraídas em quatro sectores distintos das encostas sobranceiras ao rio Tejo, na zona compreendida entre Vale de Santarém e Santarém.

2.1 Análise granulométrica

O solo de cada amostra a submeter à análise granulométrica foi previamente seco em estufa. O peso de cada amostra seca estava compreendido entre 400 e 500 g, consoante a menor ou maior dimensão das partículas constituintes. A análise granulométrica foi efectuada pelo processo de peneiração, complementado por um processo expedito de sedimentação em água (via húmida). Na peneiração foi utilizado um conjunto de peneiros (15) de malha quadrada, com abertura máxima da malha 4,00 mm e abertura mínima da malha 0,037 mm e no processo de sedimentação foi utilizado uma proveta com capacidade de 1200 cm³.

Pelas observações macroscópicas e pelas análises granulométricas efectuadas às sete amostras, foi possível identificar três grupos distintos de solo.

Quadro 1 – Resultados obtidos nas análises granulométricas.

Referência		Tipo de solo	Análise Granulométrica			
Sector	Amostra		Fracção granulométrica, d_i/D_i (mm)	Fracção predominante		% de solo passado no peneiro 200 ($D < 0,074$ mm)
				d_i/D_i (mm)	(%)	
S 5	A 1	Silto-argiloso	0/1,00	0,297/0,590	26,4	22,0%
S 6	A 2		0/1,00	0,037/0,063	13,7	22,9%
S 3	A 1	Areno-siltoso	0/1,68	0,297/0,590	41,7	11,5%
S 5	A 2		0/1,68	0,297/0,590	25,4	12,3%
S 11	A 4		0/1,68	0,297/0,590	54,7	6,0%
S 6	A 1	Arenoso (grossa)	0/4,00	0,297/0,590	45,9	0,9%
S 11	A 1	(areias) (média)	0/2,36	0,297/0,590	47,4	2,9%

Os resultados obtidos nas análises granulométricas estão resumidos no Quadro1. Neste Quadro, para além das amostras analisadas, dos sectores onde as mesmas foram extraídas e do tipo de solo, indica-se, para cada amostra, a fracção granulométrica do solo, a fracção granulométrica predominante e a percentagem desta mesma fracção relativamente ao total da amostra, bem como a percentagem de solo da amostra cujas partículas têm dimensões inferiores a 0,074 mm (passagem no peneiro 200).

Os resultados correspondentes às análises granulométricas efectuadas às sete amostras de solo estudadas indicam que:

- Em termos de dimensões das partículas que constituem as diferentes amostras, registaram-se diferenças apreciáveis;
- Os valores obtidos permitiram classificar os solos das diferentes amostras em três grupos distintos de solo: solo silto-argiloso, solo areno-siltoso e solo arenoso; as amostras de solo arenoso foram ainda classificadas de areias grosseiras e areias médias.

2.2 Ensaios de corte directo

Para a determinação das características de corte dos diferentes solos, de cada uma das sete amostras, foram preparados quatro provetes e submetidos a ensaio de corte directo, em máquina própria para este tipo de material. Os provetes foram ensaiados no estado de saturação máxima e cada um dos da mesma amostra foi sujeito a uma tensão normal diferente. Durante a aplicação da força tangencial foram medidos os deslocamentos tangenciais correspondentes.

Quadro 2 – Resultados obtidos nos ensaios de corte directo.

Sector	Amostra	Tipo de solo	Ensaio (Provete)	Tensões de corte (kPa)		Características de corte			
				Normal, σ	Tangencial, τ	Coesão (kPa)	Ang. de atrito	Coef. de correlação	
S 5	A 1	Silto-argiloso	1	50	49	44	14,5°	0,9711	
			2	100	69				
			3	200	110				
			4	400	142				
S 6	A 2		1	50	58	45	20°	0,9965	
			2	100	84				
			3	200	123				
			4	400	188				
S 3	A 1	1	50	34	21	26°	0,9920		
		2	100	79					
		3	200	126					
		4	400	213					
S 5	A 2	1	50	70	28	34°	0,9969		
		2	100	84					
		3	200	164					
		4	400	297					
S 11	A 4	1	50	51	33	23°	0,9896		
		2	100	70					
		3	200	133					
		4	400	199					
S 6	A 1	Arenoso (areias)	Grosseira	1	50	40	12	34,5°	0,9968
				2	100	81			
				3	200	163			
				4	400	284			
S 11	A 1		Média	1	50	41	16	30,5°	0,9984
				2	100	76			
				3	200	140			
				4	400	247			

Os resultados obtidos nos ensaios de corte são apresentados no Quadro 2. Neste Quadro, para além dos elementos referentes às amostras e sectores onde as mesmas foram extraídas e tipo de solo, indicam-se os valores das tensões normais e tensões tangenciais correspondentes a cada provete e os valores que quantificam as características de corte das amostras (coesão e ângulo de atrito).

Os resultados respeitantes aos ensaios de corte efectuados sobre amostras dos três tipos de solo ensaiados mostram que:

- Existem fortes correlações entre as tensões normais, σ , e as tensões tangenciais, τ , que provocaram a rotura dos diferentes provetes de cada amostra; tal significa que são insignificantes os desvios entre os pares de valores (σ , τ) correspondentes aos diferentes provetes e a recta de Coulomb que define as características de corte da amostra;
- As amostras constituídas pelo mesmo tipo de solo não apresentam grandes diferenças, quanto às suas características de corte;
- Entre os diferentes tipos de solo ensaiados registam-se apreciáveis diferenças nos valores definidores das características de corte. As amostras de solos mais arenosos pertencem os valores de coesão mais baixos e os valores de ângulo de atrito mais elevados.

2.3 Ensaios de erodibilidade

Para a determinação da maior ou menor resistência dos solos à erosão motivada pela pluviosidade, foram ensaiados, em erodímetro construído para o efeito, provetes de amostras de solo com distintas características físicas e mecânicas. Basicamente, o erodímetro (Figura 2) é formado por uma plataforma em material acrílico com 100 cm de comprimento e 18 cm de largura, fixa sobre o tampo basculante de uma mesa, por dispositivo para contenção do provete de ensaio (amostrador) com 4 cm de profundidade e uma área correspondente a 15 cm x 13 cm, por medidor de inclinações da rampa, por dois dispositivos de distribuição e medição de caudais de água e por caixa de recolha do solo arrastado. Do equipamento de ensaio fazem ainda parte uma bomba aspirante premente e três depósitos para água com a capacidade de 50 l cada.

Foram ensaiadas sete amostras de diversos tipos de solo; as amostras eram constituídas por: solo silto-argiloso, solo areno-siltoso e solo arenoso (de grão grosseiro e de grão médio a fino). O peso de solo seco de cada provete ensaiado variou entre 1200 e 1300 g e o tempo de ensaio foi de 60 minutos para os provetes das amostras de solo siltoso (5) e de 30 minutos para os provetes das amostras de solo arenoso (2). Cada amostra de solo foi submetida a ensaio com três inclinações da rampa (10°, 20° e 30°) e para cada inclinação e mesma amostra foram ensaiados, pelo menos, dois provetes. Os provetes foram moldados directamente no amostrador (Figura 1), pelo que ao solo, depois de seco e pesado, se adicionou uma determinada quantidade de água e se submeteu a uma ligeira compactação, por forma a adquirir alguma consistência. Depois de preparados os provetes e antes do ensaio, o teor de humidade das amostras siltosas era da ordem de 16% e o dos provetes das amostras arenosas era da ordem de 12%.

A erosão dos solos dos taludes, quando expostos a pluviosidade intensa, é composta de duas fases distintas (Guerra, 1995); numa primeira fase, as partículas do solo são desagregadas devido à acção directa da queda das gotas de chuva, numa segunda fase as mesmas partículas são arrastadas pela água escorrente ao longo do talude. Assim, o erodímetro utilizado nos ensaios dispõe de dois dispositivos distintos de distribuição de água: um, consta de uma caixa de fundo perfurado e com

área equivalente à da superfície livre do provete, que lança gotas de água directamente sobre o provete, o outro, consta de um tubo perfurado (8 furos) que lança água no topo superior da rampa (a 80 cm da caixa contentora do provete em ensaio), água esta que escorre e galga o próprio provete, com maior ou menor velocidade, consoante a inclinação da rampa.



Figura 1 – Preparação do provete para ensaio de erodibilidade

O ensaio de erodibilidade consistiu, fundamentalmente, em sujeitar a superfície livre do solo em ensaio a impactos de gotas de água e, simultaneamente, ao galgamento dessa mesma superfície por uma lâmina de água escorrente ao longo da plataforma. Para uma mais fácil comparação dos resultados obtidos com os diferentes provetes de ensaio e para as diversas inclinações da rampa, o caudal de água, distribuído pelos dois dispositivos, foi de sensivelmente 0,85 litro/minuto; o caudal de água lançado na parte superior da rampa foi sensivelmente duplo do caudal lançado directamente sobre o provete.



Figura 2 – Provete em ensaio de erodibilidade

Para que, durante todo o ensaio, o plano médio da superfície livre do provete não se afaste consideravelmente do plano de escoamento da água sobre a plataforma, a caixa contentora do provete (amostrador) possui fundo móvel, o qual, por meio de parafusos, faz coincidir o plano médio daquela superfície com o plano da plataforma. Para a quantificação do solo erodido durante o ensaio, foram pesadas, depois de secas, a parte arrastada e a parte não arrastada, do provete ensaiado.

Da mesma amostra e para cada inclinação da rampa do erodímetro foram ensaiados, no mínimo, dois provetes. Os resultados obtidos nos ensaios de erodibilidade são apresentados no Quadro 3 e nas Figuras 3 a 6 e respeitam às médias dos valores correspondentes aos provetes de cada amostra e mesma inclinação da rampa. Naquele Quadro indica-se, para cada amostra, a inclinação da rampa de ensaio, o peso total do solo seco antes do ensaio, o peso do solo arrastado (seco) e a percentagem do solo arrastado, relativamente à totalidade do solo de ensaio. Nas Figuras 3 a 5 representa-se, para as amostras de cada um dos três tipos de solo ensaiado, a evolução da erosão do solo com a inclinação da rampa e na Figura 6 representa-se aquela mesma evolução para o conjunto das amostras do mesmo tipo de solo.

Quadro 3 – Erosão do solo em função da inclinação da rampa.
(1 hora de precipitação em cada ensaio)

Tipo de solo	Sector	Amostra	Inclinação da rampa	Peso do solo seco (g)		Percentagem do solo arrastado (%)	
				Antes do ensaio	Arrastado		
Silto-argiloso	S 5	A 1	10°	1300	106,5	8,2	
			20°	1300	134,1	10,3	
			30°	1300	165,3	12,7	
	S 6	A 2	10°	1300	77,0	5,9	
			20°	1300	145,6	11,2	
			30°	1300	173,2	13,3	
Areno-siltoso	S 3	A 1	10°	1200	258,6	21,5	
			20°	1200	299,1	24,9	
			30°	1200	315,2	26,3	
	S 5	A 2	10°	1300	419,9	32,3	
			20°	1300	436,2	33,5	
			30°	1300	437,6	33,7	
	S 11	A 4	10°	1250	186,6	14,9	
			20°	1250	239,3	19,1	
			30°	1250	299,0	23,9	
Arenoso (areias)	(grossa)	S 6*	A 1*	10°	1300	909,3	69,9
				20°	1300	1070,0	82,3
				30°	1300	1117,5	86,0
	(média)	S 11*	A 1*	10°	1300	895,0	68,8
				20°	1300	932,2	71,7
				30°	1300	976,1	75,1

* - O tempo de ensaio nestas amostras foi apenas de 30 minutos

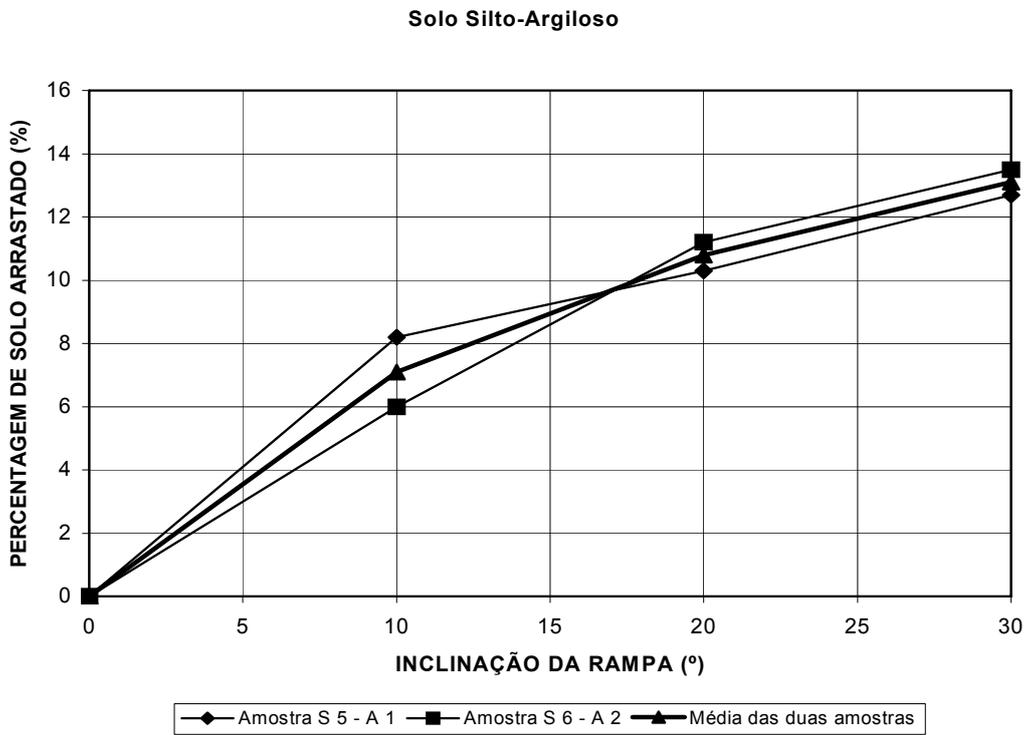


Figura 3 – Representação gráfica dos resultados obtidos através dos ensaios de erodibilidade efectuados em amostras de solo silto-argiloso.

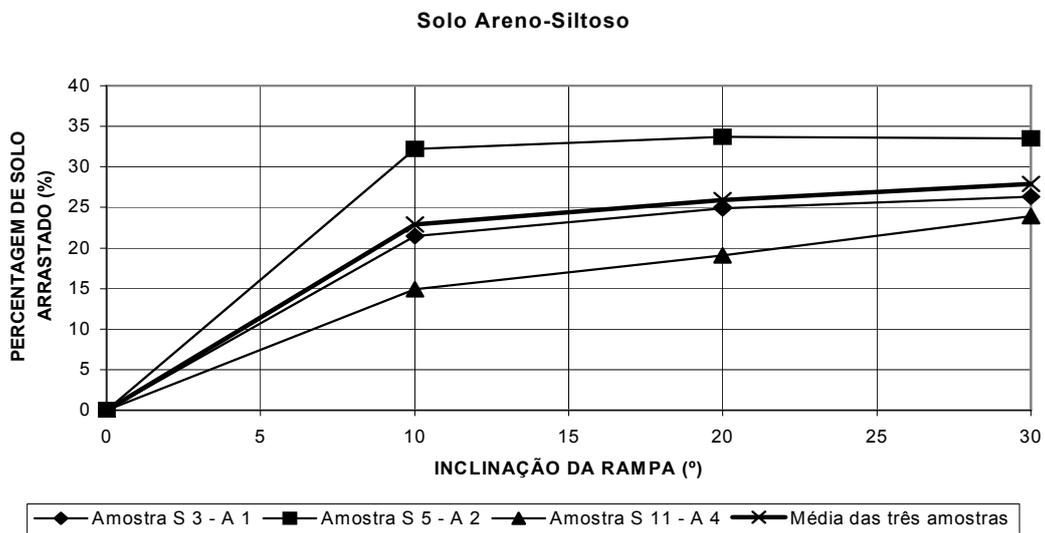


Figura 4 – Representação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios de erodibilidade em amostras de solo areno-siltoso.

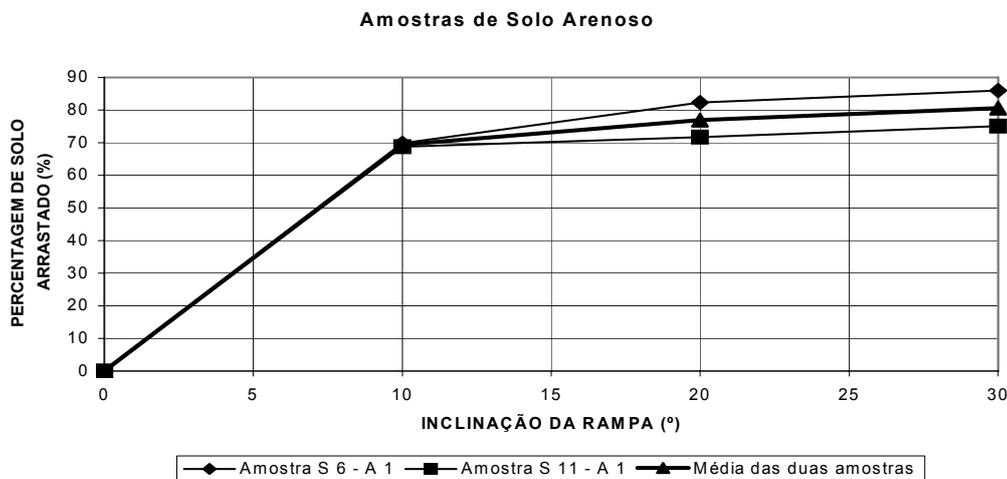


Figura 5 – Representação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios de erodibilidade em amostras de solo arenoso.

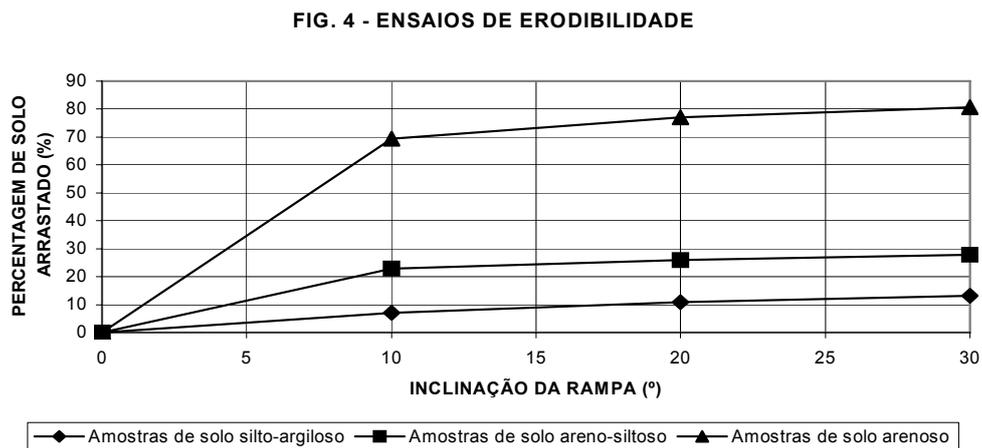


Figura 6 – Representação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios de erodibilidade das amostras consideradas.

Os resultados obtidos nos ensaios de erodibilidade mostram que:

- Para as mesmas condições de ensaio (inclinação da rampa, caudal de água e tempo de precipitação), dentro das amostras classificadas como sendo constituídas pelo mesmo tipo de solo, não se registaram variações significativas na quantidade de solo erodido (Figuras 3 a 5);
- Para a mesma amostra e mesmas condições de precipitação e tempo de ensaio, não é muito acentuado o aumento da erosão do solo para inclinações da rampa superiores aos 10°;
- Os diferentes tipos de solo ensaiados apresentam grandes diferenças entre a quantidade de material erodido, sendo essas diferenças bastante mais acentuadas nos solos mais arenosos (Figura 6).

3. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS

Com base nas percentagens de solo arrastado em cada amostra ensaiada à erodibilidade (Quadro 3), determinou-se, para cada amostra e para cada inclinação da rampa, um valor que definisse o índice de resistência do solo à erosão, para as condições do ensaio. Para isso, considerou-se que para a situação em que não se verifica qualquer arrastamento de solo (resistência máxima) o índice de resistência, I_r , assume o valor da unidade. Assim, o índice de resistência, I_r , do solo à erosão é dado por:

$$I_r = \frac{A - B}{A}, \quad (1)$$

sendo:

A - totalidade do solo ensaiado (peso seco);

B - quantidade de solo arrastado no ensaio (peso seco).

Com os valores dos índices de resistência à erosão, I_r , anteriormente determinados para cada amostra e para cada inclinação da rampa, calcularam-se os factores que relacionam o índice de resistência do solo com a inclinação da rampa e a coesão do solo; neste cálculo não se considerou o ângulo de atrito do solo, por se concluir que o mesmo é irrelevante para a resistência à erosão.

Verificou-se que, dentro do intervalo das variáveis (inclinação da rampa, α , e coesão do solo, c (em kPa) e para o caudal de água utilizado nos ensaios ($\cong 0,85$ l/min), os factores que relacionam o índice de resistência dos solos com aquelas variáveis são bem definidos por uma função múltipla linear:

$$I_r = 0,1673 - 0,2174 \text{ sen } \alpha + 0,0194 c \quad (2)$$

4. CONCLUSÕES

Os valores obtidos nos ensaios de erodibilidade realizados sobre solos com diferentes características granulométricas e de corte, permitem tirar as seguintes conclusões de ordem geral:

- a) O tipo de erodímetro utilizado e a metodologia seguida nos ensaios são bastante eficientes para a determinação da resistência dos solos à erosão, motivada pela precipitação.
- b) A inclinação dos taludes tem apreciável influência na erodibilidade do solo motivada pela pluviosidade. Porém, a quantidade de solo erodido não é directamente proporcional à inclinação do talude; a taxa de crescimento de material erodido para a inclinação de 10° é superior à que se regista para inclinações mais acentuadas.
- c) A coesão dos solos constituintes dos taludes tem influência preponderante na resistência desses mesmos solos à erosão, motivada pela pluviosidade. Para as mesmas condições (inclinação do talude e precipitação), solos com coesões da ordem de 45 kPa, relativamente a solos com muito baixos, ou nulos, valores de coesão (solos arenosos), apresentam um índice de resistência à erosão cerca de quatro vezes superior;

- d) Existe boa correlação entre o índice de resistência do solo à erosão motivada pela precipitação e a inclinação do talude e a coesão desse mesmo solo (coeficiente de correlação 0,90).

5. REFERÊNCIAS

Alcântara, M.A.T. (1997). Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, EESC/USP, São Carlos/SP.

Bastos, C.A.; Gehling, W; Militsky, J (2002). Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais e Subtropicais – 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa

Guerra, A. T.; Cunha, S.B.(1995). Geomorfologia, Uma Actualização de Bases e Conceitos. Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro

Inderbitzen, A.L.(1961). An erosion tests for soils. Material Research & Standards

Middleton, H. E. (1930). Properties of soils wich influence soil erosion. U.S. Department Agricultural Technical Bulletin, n 178.

Nascimento, U. ; Castro, E. (1976). Defesa de taludes contra a erosão. Critérios de selecção de solos. Geotecnia, Lisboa.