

Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas

Cezar Augusto Burkert Bastos¹, Wai Y. Y. Gehling² & Jarbas Milititsky²

¹*Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS*

²*Escola de Engenharia – UFRGS, Porto Alegre, RS*

RESUMO: O artigo apresenta um estudo geotécnico sobre a erodibilidade dos solos. A susceptibilidade dos solos a erosão hídrica por fluxo superficial é analisada frente a duas importantes propriedades geomecânicas dos solos residuais não saturados: colapsibilidade e coesão. A colapsibilidade foi investigada por ensaios de inundação súbita em câmaras oedométricas, enquanto a coesão foi quantificada em ensaios de cisalhamento direto com e sem controle de sucção, na umidade natural e inundados. A erodibilidade foi avaliada em ensaios de Inderbitzen e analisada pelo parâmetro taxa de erodibilidade (K), que representa a taxa de material erodido no ensaio em função do tempo e da tensão cisalhante hidráulica aplicada. A erodibilidade se apresentou melhor relacionada com a perda de coesão do solo com o umedecimento pelo fluxo superficial. Conclui-se que a perda de coesão com a inundação é um importante indicativo da susceptibilidade a erosão por fluxo superficial dos solos residuais não saturados.

1. INTRODUÇÃO

A geotecnia de solos tropicais e subtropicais brasileiros tem avançado significativamente nas últimas décadas. Entretanto, a erodibilidade constitui uma importante propriedade mecânica cujo estudo pela engenharia geotécnica não tem recebido a merecida atenção.

A erodibilidade, entendida como a propriedade que retrata a facilidade com que partículas do solo são destacadas e transportadas, necessita de métodos adequados que a caracterize para fins de engenharia. São ainda insuficientes os esforços no entendimento e na quantificação do potencial a erosão através de propriedades do comportamento estabelecidas pela Mecânica dos Solos.

As razões para tal lacuna passam pela complexidade dos mecanismos envolvidos no processo de erosão hídrica (mobilização, destacamento, transporte e deposição de partículas e/ou agregados), pelos vários fatores externos que condicionam a intensidade da ação erosiva (erosividade da chuva, geometria da encosta, cobertura vegetal,...) e também pelo grande número de fatores intrínsecos do solo que condicionam sua erodibilidade (textura, mineralogia, cimentação, estrutura, sucção). Uma revisão sobre os estudos e métodos na avaliação geotécnica da erodibilidade é apresentada em Bastos et al.[4].

A erosão hídrica acelerada, processo de rápida desagregação e remoção do solo pelas águas das

chuvas, geralmente desencadeado por ações antrópicas, representa um importante problema geotécnico e ambiental na Região Metropolitana de Porto Alegre.

No presente trabalho, a susceptibilidade dos solos a erosão hídrica é analisada frente a duas importantes propriedades dos solos residuais não saturados: a colapsibilidade e a coesão. Duas hipóteses de pesquisa são testadas: a) a erosão por fluxo superficial está relacionada ao colapso estrutural do solo superficial não saturado quando inundado ao longo do canal de fluxo e b) a resistência a erosão do solo superficial tem relação direta com a resistência ao cisalhamento do solo à superfície, representada pela coesão, propriedade esta afetada pela inundação.

2. SOLOS ESTUDADOS

Foram escolhidos e caracterizados quatro perfis de solos residuais da Região Metropolitana de Porto Alegre, que se destacam por acentuados processos erosivos:

- perfil ALG – solo residual de granito, localizado no Loteamento Algarve, município de Alvorada/RS (Figura 1). Área sujeita a intensos processos erosivos por ravinas e boçorocas. Horizontes estudados: B (solo ALGB) e C (solo ALGC);

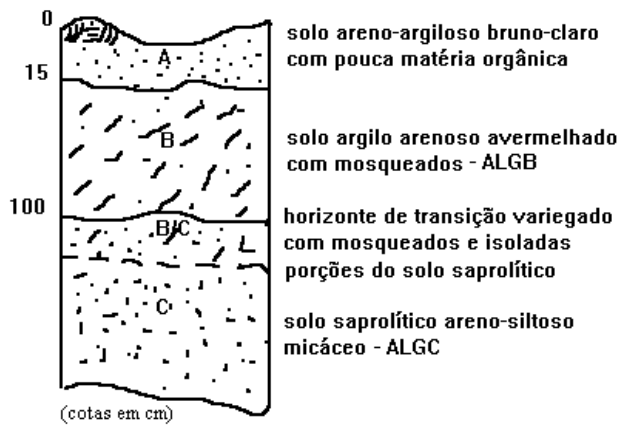


Figura 1 – Perfil ALG



Figura 3 – Perfil PT

- perfil RS-239 – solo residual do Arenito Botucatu (pouco intemperizado) localizado em talude às margens da rodovia RS-239, no município de Campo Bom/RS (Figura 2). Material sujeito a processos erosivos por ravinamento em cortes na região. Horizontes estudados: BC (solo RS239BC) e C (solo RS239C);



Figura 2 – Perfil RS239



Figura 4 – Perfil CD

- perfil PT – solo residual do Arenito Botucatu (fortemente intemperizado) em loteamento do município de Novo Hamburgo/RS (Figura 3). Sujeito a processos erosivos por ravinas e boçorocas. Horizontes estudados: B (solo PTB) e C (solo PTC);
- perfil CD – solo residual de granito localizado na zona sul de Porto Alegre (Figura 4). Representa os processos de erosão por ravinamento, típicos dos solos dos morros graníticos da capital. Horizontes estudados: B (solo CDB) e C (solo CDC);

A caracterização geotécnica dos solos é apresentada na Tabela 1.

3. AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE

A resistência à erosão dos solos estudados foi inicialmente avaliada com base na observação do comportamento dos perfis em campo. Como critério foi levado em conta a magnitude e a frequência dos processos erosivos em situações onde os solos investigados são expostos à ação do fluxo hídrico superficial. A Tabela 2 apresenta a erodibilidade relativa dos solos.

Com objetivo de avaliar a erodibilidade dos solos em laboratório foi escolhido o ensaio de Inderbitzen, executado em equipamento construído com base na concepção original de Inderbitzen [9] e em experiências posteriores no país (p.ex. Fácio [8]). Consiste em uma rampa de inclinação variável através da qual uma amostra indeformada de 10 cm de diâmetro disposta rente ao fundo é sujeita a um fluxo uniforme, dada uma vazão escolhida (Figura 5). É medida a perda em peso de solo seco erodido com relação a área da amostra e ao tempo de fluxo. Foram empregadas inclinações de 10°, 26°, 45° e 54°, simulando condições de arruamentos em encostas e de taludes rodoviários,

e vazões de 3 e 6 l/min. Amostras foram ensaiadas na umidade natural e em condições extremas de umidade (secas ao ar e pré-umedecidas).

A tensão cisalhante hidráulica (τ_h) aplicada nos ensaios é estimada através da equação abaixo, oriunda da hidráulica de canais:

$$\tau_h = \gamma \cdot h \cdot d \quad (1)$$

onde γ = peso específico do fluido, h = altura da lâmina de fluxo e d = declividade do escoamento.

Relacionando os valores de τ_h com a correspondente perda de solo, foram estimadas a tensão cisalhante hidráulica para a mínima perda de solo - tensão cisalhante hidráulica crítica ($\tau_{h_{crit}}$) - e a taxa de perda de solo com a tensão cisalhante hidráulica - taxa de erodibilidade (K) - para os solos nas diferentes condições de umidade.

Os resultados obtidos nos ensaios de Inderbitzen são apresentados na Tabela 3. Estes permitiram categorizar os solos quanto sua resistência à erosão. Sugere-se, numa primeira aproximação, que os solos mais erodíveis apresentam valores de K (amostras na umidade natural) superiores a $0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ e que os solos mais resistentes à erosão apresentam valores de K inferiores a $0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$.

Os resultados obtidos são discutidos em detalhe em Bastos [2] e Bastos et al.[3].

As Figuras 6a e 6b ilustram graficamente os resultados obtidos.

4. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E COLAPSIBILIDADE

Com o objetivo de trazer elementos para a interpretação da erodibilidade dos solos estudados, foram obtidos parâmetros geotécnicos de resistência ao cisalhamento e colapsibilidade a partir de ensaios específicos.

A Tabela 4 traz os resultados de coesão obtidos em ensaios de cisalhamento direto com controle de sucção e convencionais. Para os perfis ALG são apresentados os valores de coesão correspondentes aos valores médios da sucção matricial em função da variação de umidade natural registrada em campo. Cabe destacar que todos os solos estudados mostram redução de coesão com a inundação.

Neste estudo sobre erodibilidade de solos não saturados tornou-se útil conceber um parâmetro

indicativo da susceptibilidade à redução da coesão durante um evento pluviométrico, evento este que provoque a saturação do solo ao longo do canal de fluxo superficial. Este parâmetro, chamado de variação de coesão, Δc , é definido como:

$$\Delta c = \frac{c_{nat} - c_{inu}}{c_{nat}} \quad (2)$$

(expresso em porcentagem)

onde c_{nat} é a coesão do solo na umidade natural e c_{inu} é a coesão obtida em ensaios inundados.

A Tabela 4 também apresenta os valores médios dos índices de colapso, obtidos de ensaios de colapsibilidade em oedômetros para valores mínimos de tensão normal na faixa de umidade natural dos solos estudados. Quanto a colapsibilidade, observa-se que os solos CDC, ALGB, CDB e PTC destacam-se pelos maiores valores de i_c . Entretanto, nenhum destes ultrapassam o limite de 2% proposto por Vargas [11] para caracterizar solos colapsíveis.

Estes resultados são apresentados em detalhe em Bastos et al.[5] e Bastos [2].

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c_{nat} , c_{inu} e Δc) e colapsibilidade (i_c) foram relacionados à erodibilidade relativa observada em campo e àquela medida em laboratório pelos ensaios de Inderbitzen (representada pelos valores da taxa de erodibilidade K para amostras na umidade natural).

Foi realizada uma análise estatística por modelo de regressão linear, onde a variável dependente é o logaritmo da taxa de erodibilidade K e as variáveis independentes os parâmetros de resistência e colapsibilidade. Testes de significância foram executados para cada um dos parâmetros nos modelos, usando a distribuição de Student (teste t).

Os parâmetros coesão na condição de umidade natural de campo (c_{nat}) e coesão inundada (c_{inu}), quando relacionados a taxa de erodibilidade, não permitiram distinguir as classes de erodibilidade relativa propostas. Entretanto, a variação de coesão (Δc) permite inferir a tendência de crescimento da taxa de erodibilidade com a perda de coesão e identificar os solos com média a alta e alta erodibilidade como aqueles que apresentam uma elevada variação de coesão com a inundação. A

relação $\Delta c \times K$ foi considerada significativa no modelo de regressão adotado (Figura 7).

O potencial de colapso não mostrou relação com a taxa de erodibilidade, uma indicação de que a colapsibilidade não está relacionada à erodibilidade. Embora o processo de desagregação em água por hidratação e desaeração do solo não saturado esteja envolvido nos dois fenômenos: colapso e erosão, o resultado obtido pode ser explicado pela diferente natureza dos esforços envolvidos: compressão e cisalhamento hidráulico, respectivamente.

6. DISCUSSÃO

O papel da coesão e da sua variação com a sucção matricial na erodibilidade de solos tropicais já foi discutido por outros autores. Bender [6] já considerava a erodibilidade uma função da coesão do solo na superfície, alterada durante um evento pluviométrico. Segundo este, a coesão seria o parâmetro mais adequado para avaliar a estabilidade à erosão de solos saprolíticos. Alvarenga e Carmo [1], avaliando taludes de solos residuais de gnaise, Fácio [8], ao estudar solos lateríticos do Distrito Federal, e Conciani [7], ao estudar solos do Cerrado, também destacam o papel da perda de coesão com a redução da sucção matricial na erodibilidade dos solos tropicais.

Segundo o modelo apresentado por Nearing et al.[10], a erodibilidade é influenciada pela variação da sucção matricial do solo no intervalo entre dois eventos pluviométricos. A sucção matricial seria capaz de gerar um ganho “permanente” de resistência a erosão, num efeito análogo ao ganho de resistência devido ao pré-adensamento de solos argilosos.

As discussões apresentadas nos trabalhos citados auxiliam na interpretação da relação encontrada entre a erodibilidade e o parâmetro Δc . A tendência dos resultados indica que os solos cuja coesão reduz significativamente com o umedecimento pela ação do fluxo superficial são aqueles mais susceptíveis à erosão e associados a processos de erosão hídrica acelerada.

É possível supor que os solos mais erodíveis são aqueles que no intervalo entre dois eventos pluviométricos apresentam como significativa parcela de sua resistência ao cisalhamento, responsável por garantir sua estabilidade superficial na encosta ou talude, o vulnerável ganho de coesão pela sucção matricial.

Os solos saprolíticos arenosos são aqueles potencialmente mais erodíveis. A mais baixa resistência a erosão destes solos parece estar relacionada a redução na coesão entre partículas e/ou entre agregados, provocada pela perda de cimentação e de sucção em virtude do aumento de umidade pelo fluxo de água superficial.

A redução na coesão superficial com o umedecimento dos solos foi evidenciada por diferentes manifestações, tanto diretamente pelo acentuado decréscimo no intercepto coesivo medido nos ensaios de cisalhamento direto, como indiretamente pela redução na resistência do solo a penetração superficial (em ensaios de cone de laboratório), assim como pela destacada desagregação em água dos solos erodíveis.

Em resumo, o parâmetro Δc representa os seguintes efeitos do fluxo superficial sobre a resistência ao cisalhamento e, por conseguinte, sobre a erodibilidade dos solos:

- A drástica redução na parcela de resistência associada a propressão negativa;
- Perda de cimentação interpartículas e interagregados pela ação da água (de particular importância para os solos saprolíticos);
- Ação desagregadora provocada pelas tensões internas geradas devido a mecanismos de hidratação e desaeração.

7. CONCLUSÕES

Apesar do limitado universo de solos estudados, os resultados obtidos permitem destacar importantes conclusões:

- A relação entre os parâmetros de resistência e a erodibilidade dos solos estudados indicou que tanto a coesão não saturada como a coesão medida na condição inundada não possibilitaram distinguir as classes de erodibilidade relativa propostas. Já a variação de coesão (Δc) apresenta relação estatística significativa com a taxa de erodibilidade K e permite identificar os solos estudados com média a alta e alta erodibilidade como aqueles com $\Delta c \geq 85\%$;
- O coeficiente de colapso estrutural obtido para baixo nível de carregamento normal não apresentou relação significativa com o parâmetro K . Embora supunha-se que os fenômenos de colapso e erosão estivessem relacionados pelo processo de desagregação do

solo em água, a diferença na natureza dos esforços envolvidos (compressão e cisalhamento hidráulico, respectivamente) pode explicar os resultados obtidos.

Logo, a análise das propriedades geomecânicas estudadas frente à erodibilidade vem a confirmar uma das hipóteses de pesquisa: o importante papel da coesão na interpretação da susceptibilidade dos solos a erosão hídrica. Os resultados obtidos indicam que os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam maior redução da coesão com a saturação do solo na condição de fluxo d'água superficial.

Estas conclusões vêm a compor a proposta metodológica para avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados apresentada por Bastos [2].

AGRADECIMENTOS

Aos bolsistas e técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRGS e ao PICD/CAPES pelo apoio.

REFERÊNCIAS

1. Alvarenga, M.M.; Carmo, J.C. do *Alguns problemas de estabilidade de taludes de corte em materiais residuais de rocha gnáissica*. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1., 1976, Rio de Janeiro/RJ. Anais... Rio de Janeiro/RJ: ABGE, 1976. v.1, p.117-129.
2. Bastos, C.A.B. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Porto Alegre/RS, 1999, 298p. Tese de doutorado. PPGEC/UFRGS.
3. Bastos, C.A.B.; Milititsky, J.; Gehling, W.Y.Y. *Emprego do ensaio de Inderbitzen e da Metodologia MCT no estudo da erodibilidade de solos residuais da Grande Porto Alegre*. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 9., 1999, São Pedro/SP. Anais... São Pedro/SP: ABGE, 1999 (em CD).
4. Bastos, C.A.B.; Milititsky, J.; Gehling, W.Y.Y. *A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências*. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.1, 2000. Rio Grande/RS: Ed. Dunas, 2000. p.17-26.
5. Bastos, C.A.B.; Milititsky, J.; Gehling, W.Y.Y.; Bica, A.V. e Davison Dias, R. *Resistência ao cisalhamento de um solo granítico através de ensaios de cisalhamento direto com controle de sucção*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, XI, 1998, Brasília/DF. Anais... Brasília/DF: ABMS, v.1, p.43-50.
6. Bender, H. *Erosion: Un probleme de resistance au cisaillement en fonction du chemin des contraintes pendant l'infiltration*. In: International Conference on Geomechanis in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 1., 1985, Brasília/DF. Proceedings..., Brasília/DF : ABMS, 1985. v.2, p.15-25.
7. Conciani, W. *Surgimento de voçorocas em áreas de solo colapsível*. Simpósio Brasileiro de Controle de Erosão, 6., 1998, Presidente Prudente/SP. Anais... Presidente Prudente/SP: ABGE, 1998. (em CD).
8. Fácio, J.A. *Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal*. Brasília/DF, 1991. Dissertação de Mestrado. Depto Eng Civil / UnB.
9. Inderbitzen, A.L. *An erosion test for soils*. Materials Research & Standards, jul/1961, p. 553-554.
10. Nearing, M.A.; West, L.T.; Brown, L.C. *A consolidation model for estimating changes in rill erodibility*. Transactions of ASAE, v.31, n.3, p.696-700, 1988.
11. Vargas, M. *Engineering properties of residual soils from south-central region of Brazil*. In: International Congress IAEG, 2., 1974, São Paulo/SP. Proceedings... São Paulo/SP: ABGE, 1974. v.1, p.IV-pc-5.1/5.25.

Tabela 1 - Caracterização geotécnica dos solos estudados.

SOLO	Granulometria					Lim Atterb.		Umid.	Classificação	
	A.Grossa (%)	A.Média (%)	A.Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	w _L (%)	IP (%)	w _{campo} (%)	Classif. SUCS	Classif. MCT
ALGB	1	16	29	12	42	41	10	21 a 30	ML	LG'
ALGC	12	41	23	17	7	39	5	9 a 22	SM	NS'
RS239BC	-	-	68	9	23	23	7	14 a 26	SM-SC	NA'
RS239C	-	-	74	10	16	20	6	8 a 14	SM-SC	NA'
PTB	-	3	35	5	57	44	13	15 a 23	ML	LG'
PTC	-	8	62	18	12	19	5	10 a 13	SM-SC	NA'
CDB	23	16	13	10	38	53	22	10 a 20	SM	LG'
CDC	25	28	17	19	11	38	16	9 a 20	SC	NS'

Tabela 2 - Erodibilidade relativa dos solos

SOLO	ERODIBILIDADE RELATIVA
ALGB	baixa
ALGC	alta
RS239BC	média a baixa
RS239C	média
PTB	baixa
PTC	alta
CDB	média a baixa
CDC	média a alta

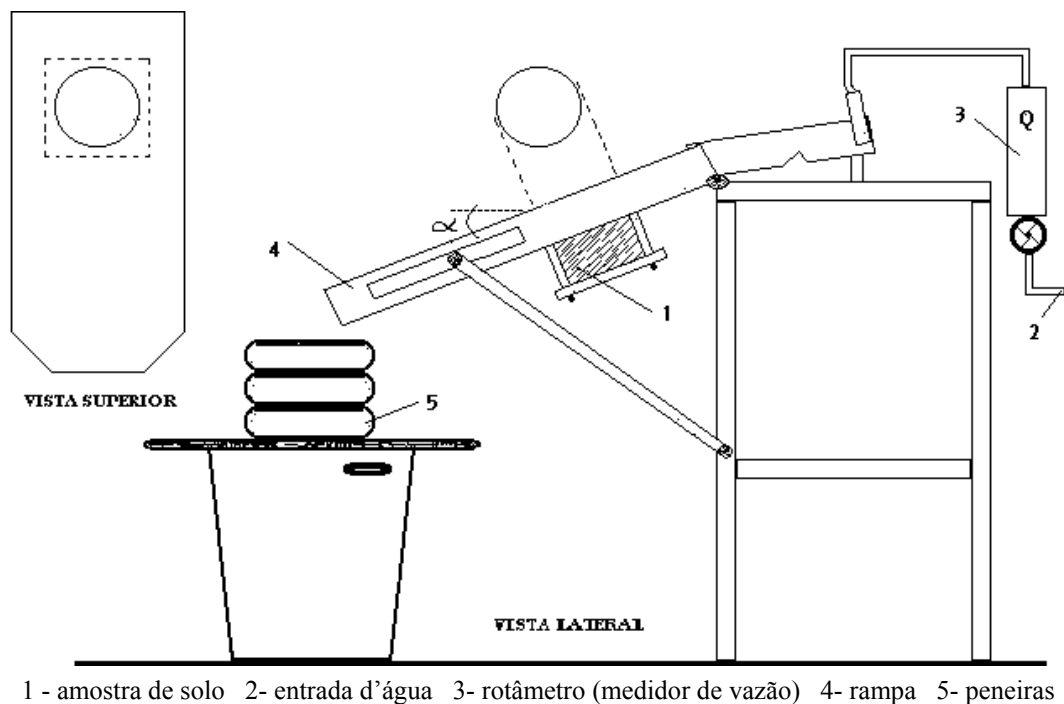


Figura 5 - Equipamento para o ensaio de Inderbitzen

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de Inderbitzen - Perda de Solo (em 10^{-3} g/cm²/min), para diferentes condições de fluxo (Q- vazão e i- inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros $\tau_{h\text{crit}}$ (em Pa) e K (em 10^{-2} g/cm²/min/Pa):

SOLO	COND.	Q = 3l/min				Q = 6l/min				$\tau_{h\text{crit}}$ (Pa)	K (10^{-2} g/cm ² / min/Pa)
		i=10°	i=26°	i=45°	i=54°	i=10°	i=26°	i=45°	i=54°		
τ_h (Pa) →		1,136	1,710	2,585	3,297	1,393	2,018	2,742	3,239		
ALGB	seca ar	36,3	-	118,3	-	39,4	-	305,4	-	1	12,9
	w nat.	0,9	-	1,7	2,6	3,0	-	4,7	-	indet.	0,07
	pré-umid.	0,6	-	0,8	1,4	1,0	-	1,4	-	indet.	0,03
ALGC	seca ar	88,9	-	421,7	-	232,9	-	617,6	-	0,69	26,7
	w nat.	112,2	303,8	-	-	205,0	345,3	582,2	-	0,70	28,3
	pré-umid.	61	-	459,2	-	174,2	-	549,7	-	0,86	28,1
RS239 BC	seca ar	63,8	407,6	501,1	-	117,0	602,4	459,0	-	0,28	22,8
	w nat.	3,9	2,5	3,0	-	5,7	-	21,4	-	0,77	0,65
	pré-umid.	2,1	0,2	0,6	-	0,5	-	0,6	3,0	indet.	0,04
RS239 C	seca ar	81,6	-	82,2	-	155,0	-	116,0	-	indet.	3,6
	w nat.	21,8	-	5,3	-	43,1	-	30,5	-	0,25	1,5
	pré-umid.	3,5	-	5,3	-	2,3	-	5,6	-	indet.	≈ 0
PTB	seca ar	14,3	82,2	94	-	23,7	-	340,4	-	1,17	14,8
	w nat.	1	-	1,2	-	1,4	4,4	2,3	0,9	indet.	≈ 0
	pré-umid.	0,2	-	0,4	-	0,1	-	0,8	2,6	indet.	0,09
PTC	seca ar	150,5	-	615,5	-	273,4	-	720,3	-	0,63	33,0
	w nat.	108,7	-	614,4	-	244,8	-	740,6	-	0,79	36,3
	pré-umid.	61,2	-	515,6	-	135,6	-	692,9	-	1,00	36,5
CDB	seca ar	5,6	-	120,9	-	39,9	95,4	432,5	-	1,25	19,0
	w nat.	1,0	-	5,6	-	6,6	15,8	8,5	16,7	indet.	0,47
	pré-umid.	0,3	-	9,4	-	9,2	4,9	15,5	5,5	indet.	0,29
CDC	seca ar	29,2	-	182,8	-	92,2	273,5	617,7	-	1,05	25,9
	w nat.	7,9	-	61,4	-	31,0	208,7	136,4	-	0,56	6,3
	pré-umid.	9,0	-	19,3	-	19,0	108,5	96,2	-	0,56	3,6

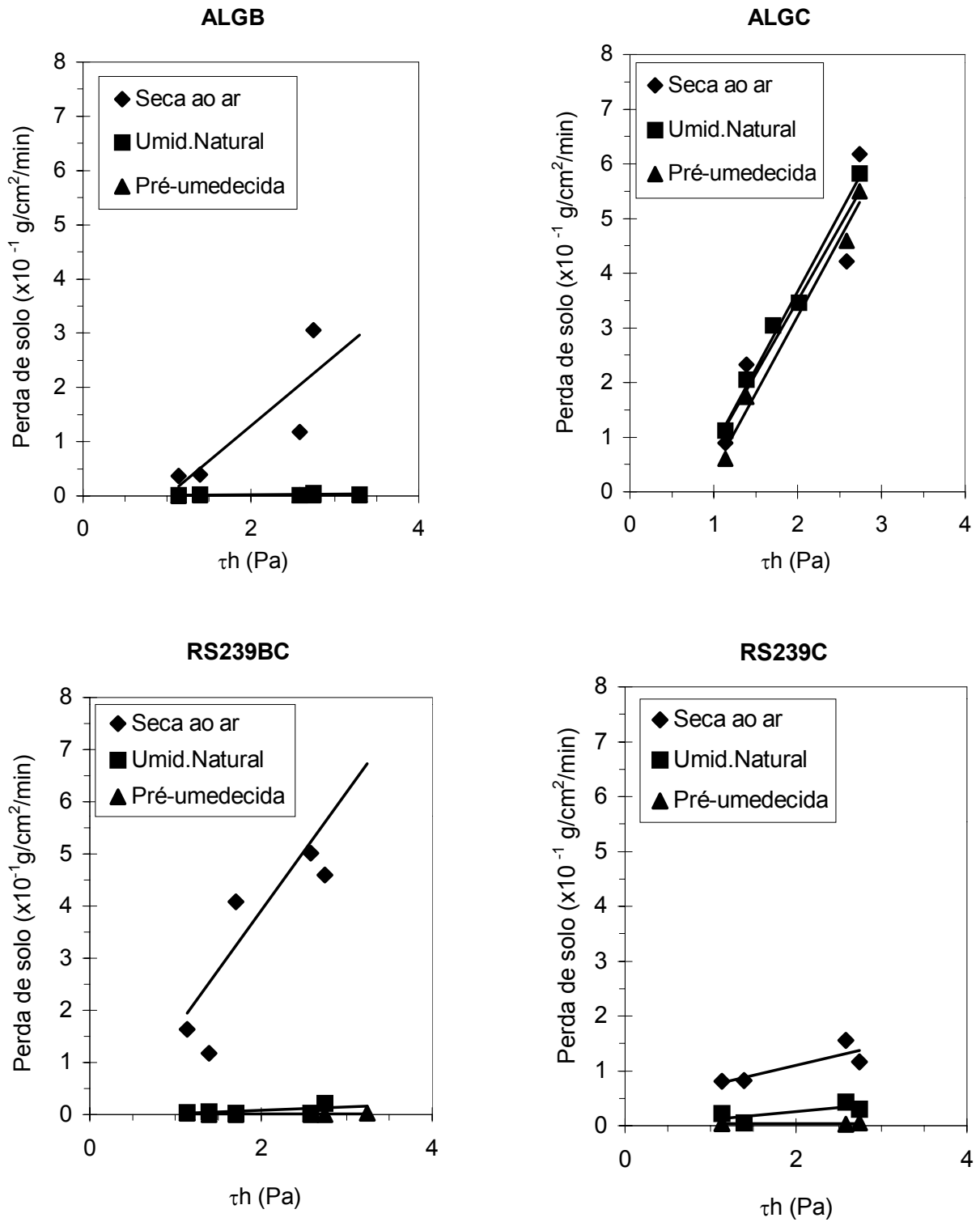


Figura 6a - Perda de solo x tensão cisalhante hidráulica – Resultados dos ensaios de Inderbitzen (perfis ALG e RS239)

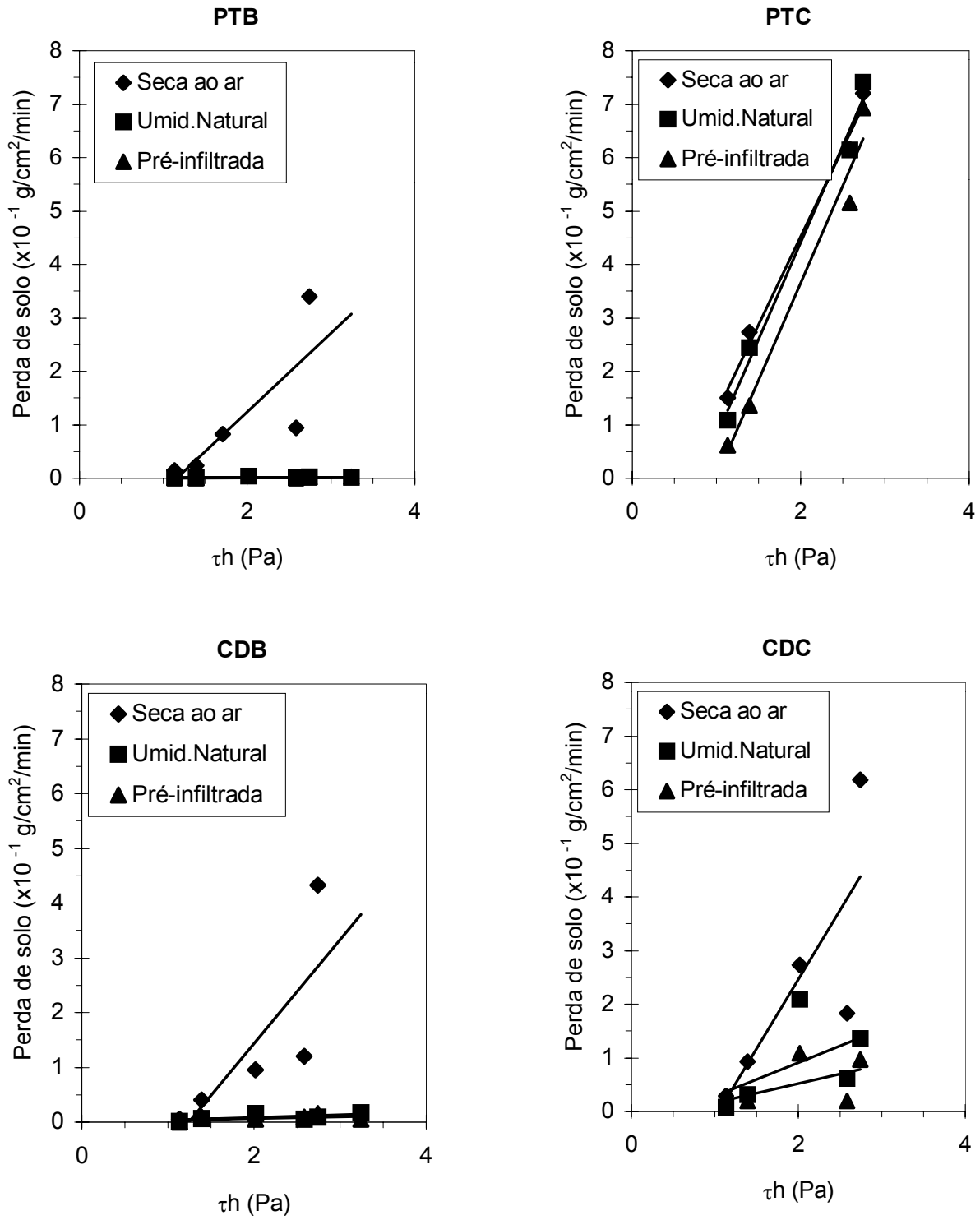
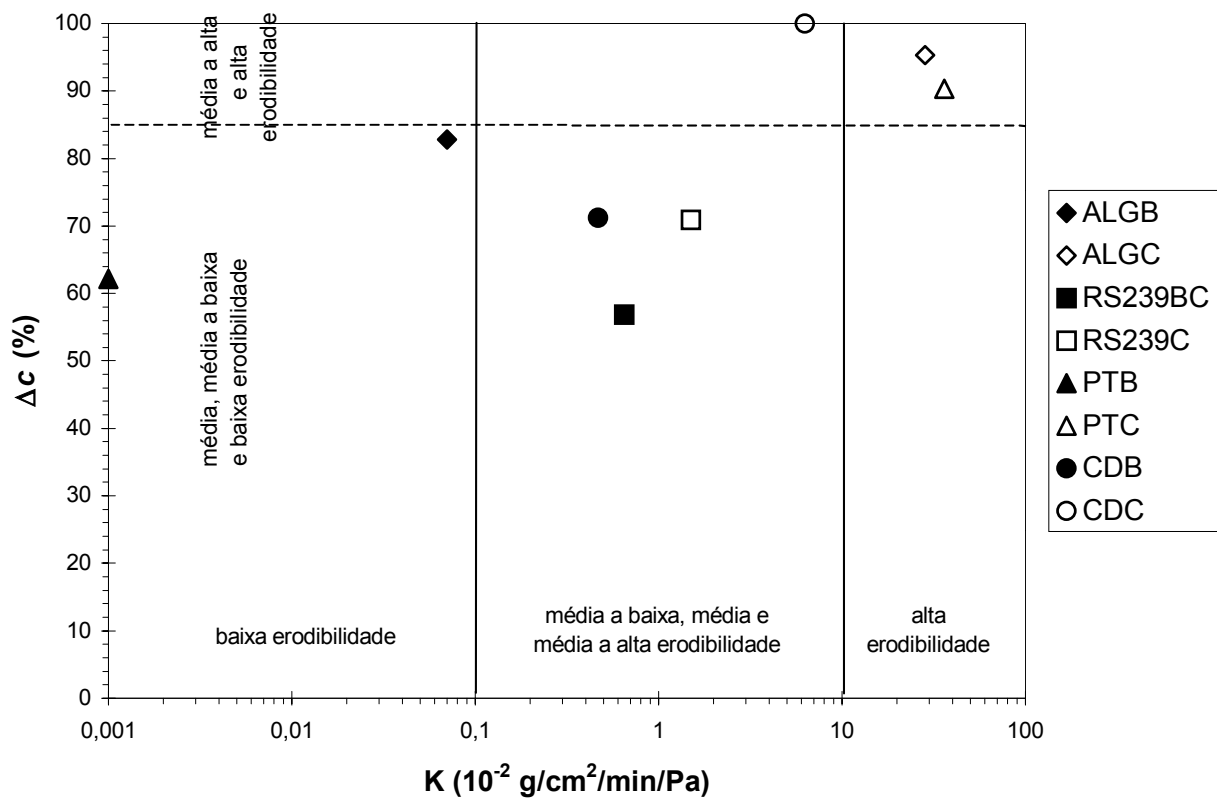


Figura 6b - Perda de solo x tensão cisalhante hidráulica – Resultados dos ensaios de Inderbitzen (perfis PT e CD)

Tabela 4 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento e de colapsabilidade.

Solo	Condição	Resistência ao cisalhamento		Colapso
		c (kPa)	Δc (%)	i_c (%)
ALGB	w natural	11,6	82,8	0,87
	inundado	2,0		
ALGC	w natural	19,1	95,3	0,08
	inundado	0,9		
RS239BC	w natural	20,2	56,9	0,03
	inundado	8,7		
RS239C	w natural	15,1	70,9	0,05
	inundado	4,5		
PTB	w natural	18,0	62,2	0,02
	inundado	6,8		
PTC	w natural	24,8	90,3	0,55
	inundado	2,4		
CDB	w natural	12,5	71,2	0,65
	inundado	3,6		
CDC	w natural	15,4	100	1,60
	inundado	0		

Figura 7 - Relação entre a variação de coesão (Δc), a taxa de erodibilidade (K) e a erodibilidade relativa dos solos estudados