

# USO DOS ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE CONE, DESAGREGAÇÃO, SUÇÃO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA AVALIAR A ERODIBILIDADE

Use of penetration, disaggregation, suction and tensile strength tests for evaluating soil erodibility

Rodrigo da Cruz de Araujo\*

Tácio Mauro Pereira Campos\*\*

**RESUMO** – Apesar dos muitos estudos em diferentes áreas, como pedologia, geografia e geotecnia, a erosão superficial de solo é um fenômeno bastante complexo ainda não completamente compreendido. Neste trabalho, as amostras coletadas de três solos, selecionadas com base nas feições erosivas que apresentavam em campo, foram submetidas a ensaios de desagregação e de penetração de cone, propostos na literatura como avaliadores da erodibilidade de solos, e também a ensaios de sucção e resistência à tração, propostos aqui como possíveis métodos indiretos indicativos da susceptibilidade à erosão de um solo. Pôde-se concluir que os ensaios de desagregação e penetração de cone apresentam resultados de boa qualidade, sendo satisfatoriamente representativos do comportamento que se pode esperar em campo para os solos de uma maneira geral. Trata-se, portanto, de ensaios muito úteis, uma vez que apresentam a vantagem de serem de execução muito simples e fácil. Os estudos realizados indicaram ainda que a sucção e a resistência à tração também demonstram relação direta com o processo erosivo.

**ABSTRACT** – Despite of many studies in different areas, such as pedology, geography and geotechnics, erosion is a complex phenomenon not yet completely understood. In this work the samples collected from three soils selected in the field, taking into account their erosive features, were submitted to disaggregation and penetration tests, proposed in the literature to evaluate the soil erodibility and also to suction and tensile strength tests, proposed here as methods indicative of susceptibility to erosion. It was concluded that disaggregation and penetration tests results have good quality, satisfactorily representing the field expected behavior. They are, therefore, very useful tests, presenting the advantage of being very simple and easy to implement. The research also indicates that suction and tensile strength show direct relationship with erosive processes.

**PALAVRAS CHAVE** – Erodibilidade, ensaios de laboratório, sucção, resistência à tração.

## 1 – INTRODUÇÃO

A erosão é um fenômeno bastante complexo, uma vez que envolve a ação direta ou indireta de diversos fatores, tais como as características geológicas e geomorfológicas, os tipos de solos, clima, vegetação, além da interferência humana que modifica as condições naturais de cada um deles.

Devido à complexidade do processo, seu entendimento ainda não é completo, necessitando de pesquisas que possam confirmar as considerações existentes e proporcionar novos conhecimentos. Bertoni e Lombardi Neto (2008) expõem que os fatores que influem no processo erosivo são chuva, infiltração, topografia do terreno, cobertura vegetal e natureza do solo. Na mesma linha, Silva (2007)

---

\* Professor Adjunto, Faculdade de Engenharia Civil, Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará. E-mail: rodrigocruz@ufpa.br

\*\* Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. E-mail: tacio@puc-rio.br

expõe que de modo geral consideram-se como fatores controladores dos processos erosivos a erosividade da chuva, as propriedades dos solos, a cobertura vegetal e as características das encostas.

Neste trabalho, procura-se fazer um estudo direcionado principalmente para uma verificação da confiabilidade de alguns métodos simples propostos para avaliação da erodibilidade de solos. Esta avaliação é realizada por meio da análise conjunta de observações feitas em campo e resultados de ensaios de laboratório.

Optou-se então por trabalhar com solos de uma formação geológica denominada “Formação Macacu”, no estado do Rio de Janeiro. Tal escolha se deu porque tal formação é representante na região de uma unidade sedimentar notável pela sua extensão, encontrada desde o Pará até o Rio de Janeiro, delineando-se ainda depósitos correlacionáveis na região sul. Esta unidade é conhecida como “Barreiras” e corresponde a depósitos sedimentares continentais pertencentes ao terciário.

## **2 – ASPECTOS GERAIS DA ÁREA ESTUDADA**

A Formação Macacu, da qual foram coletadas as amostras dos solos estudados neste trabalho, foi descrita por Meis e Amador (1972 e 1977) e Amador (1980) e corresponde a depósitos representantes do Grupo Barreiras na região da Baía de Guanabara. Sua ocorrência na região é bastante significativa, com uma abrangência que inclui os municípios de Itaboraí, Cachoeiras de Macacu, Duque de Caxias, São Gonçalo e Rio de Janeiro.

Amador (1996) descreve a formação como “uma sucessão de lentes e camadas pouco espessas de sedimentos arenosos, areno-argilosos, argilo-arenosos e argilo-silticos, pouco consolidados e afossilíferos”.

Os sedimentos da formação apresentam baixa seleção, atribuída à pouca competência do agente de deposição, em termos de produzir selecionamento, e às distorções provocadas nos sedimentos por alteração pós-deposicional.

Freqüentemente podem ser encontradas ferrificações (concreções limoníticas), como produto da diagênese. Também se verificam, embora mais eventuais, concreções silicosas, normalmente desenvolvidas a partir de areias arcoseanas.

Em Itambi, local do perfil em estudo, se verificam afloramentos da fácies mais fina, de baixa energia e característica de centro de bacia. Muito finos e plásticos, os sedimentos deste ambiente são explorados para serem utilizados como matéria-prima da indústria de cerâmicas e olarias, atividade esta já tradicional na região.

## **3 – ESTUDOS EXECUTADOS E MÉTODOS ADOTADOS**

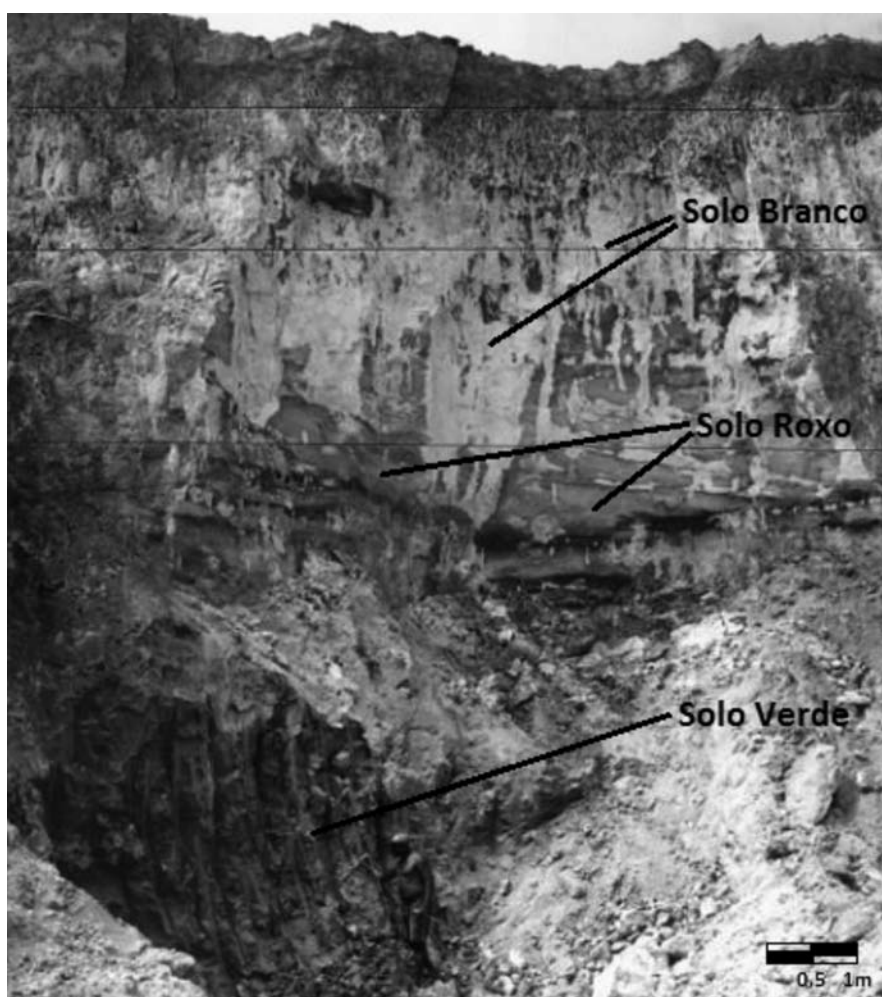
Neste item, serão abordados os procedimentos utilizados para o desenvolvimento do estudo proposto, os quais consistiram em trabalhos de campo e de laboratório.

### **3.1 – Trabalhos de campo**

Os trabalhos de campo consistiram em visitas aos locais de ocorrência da Formação Macacu, a fim de se observar suas características e selecionar um perfil representativo desta formação, utilizado como seção-tipo na pesquisa.

A partir da observação em campo, foi selecionado um perfil representativo das feições típicas encontradas na região. O perfil escolhido (Figura 1) tem aproximadamente 10m de altura, podendo-se identificar (de maneira preliminar, apenas por meio de análise tátil-visual) da base para o topo, as seguintes características por camadas, constituídas por:

- solo de textura essencialmente argilosa (posteriormente classificado como CH pelo sistema unificado de classificação de solos), coloração verde, com consistência firme e baixa porosidade, muito plástico, espessura exposta de aproximadamente 2m;
- solo de textura silto-arenosa, (posteriormente classificado como MH pelo sistema unificado de classificação de solos), coloração arroxeadada, com ocorrência de oxidação de ferro, presença de lentes do solo superior branco, transição entre ambos irregular, porém de fácil visualização. Observa-se a presença de quartzo e mica. Espessura de aproximadamente 4,6m;
- solo de textura areno-argilosa, (posteriormente classificado como SC pelo sistema unificado de classificação de solos), coloração branca, com mosqueamento por óxido de ferro. Presença de quartzo, mica e feldspato. Espessura de 2,4m;
- horizonte laterítico, com presença de concreções ferruginosas. Neste, por ser presumivelmente o menos erodível, não foram coletadas amostras. A espessura é de cerca de 0,5m; cobertura amarela laterizada, com 0,5m de espessura.



**Fig. 1** – Foto-montagem da seção-tipo representativa da Formação Macacu selecionada.

A observação de exposições possibilitou a comparação das condições dos solos ao longo do tempo. Desta forma, foi possível identificar feições erosivas presentes nos solos da formação em estudo, a partir do que se concluiu que o solo da camada areno-argilosa branca, classificado como SC, apresenta maior erodibilidade que o solo da camada MH, identificado visualmente como silto-arenoso de cor roxa. A observação das condições de erosão do CH (identificado em campo como argiloso de cor verde) foi muito difícil, uma vez que na maioria dos casos o mesmo se encontrava encoberto pelo próprio material erodido das camadas superiores. Quando se pôde observá-lo, o material não indicava a ocorrência de erosão, parecendo ser o menos erodível dentre as três camadas de solo.

Por uma questão de simplificação, neste trabalho, os solos SC, MH e CH, são “vulgarmente” chamados respectivamente de branco, roxo e verde em virtude da primeira identificação visual das camadas em campo.

### **3.2 – Trabalhos de laboratório**

De acordo com os objetivos estabelecidos para este trabalho, definiu-se um programa experimental, visando verificar se os resultados obtidos em laboratório seriam de fato representativos dos aspectos de erodibilidade observados em campo no material relacionado.

Os ensaios aqui analisados quanto à adequabilidade para avaliação da erodibilidade foram os de desagregação, de penetração de cone, resistência à tração e sucção.

#### **3.2.1 – Ensaios de caracterização dos solos**

Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterizações dos solos em questão, determinando-se para cada um deles a umidade natural ( $w_{nat}$ ), umidade higroscópica ( $w_h$ ), os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), a granulometria (com uso de defloculante), a densidade dos grãos ( $G_s$ ) e o peso específico natural de cada um dos solos e mineralogia da fração argilosa.

#### **3.2.2 – Ensaio de desagregação**

O ensaio de desagregação é um dos ensaios “clássicos” de avaliação da erodibilidade dos solos, realizada a partir da observação de como o solo reage ao ser mantido em contato com a água.

Neste trabalho, a metodologia adotada foi a proposta por Santos (1997), submetendo-se as amostras à imersão total desde o início do ensaio, o qual tem duração preestabelecida de 24 horas.

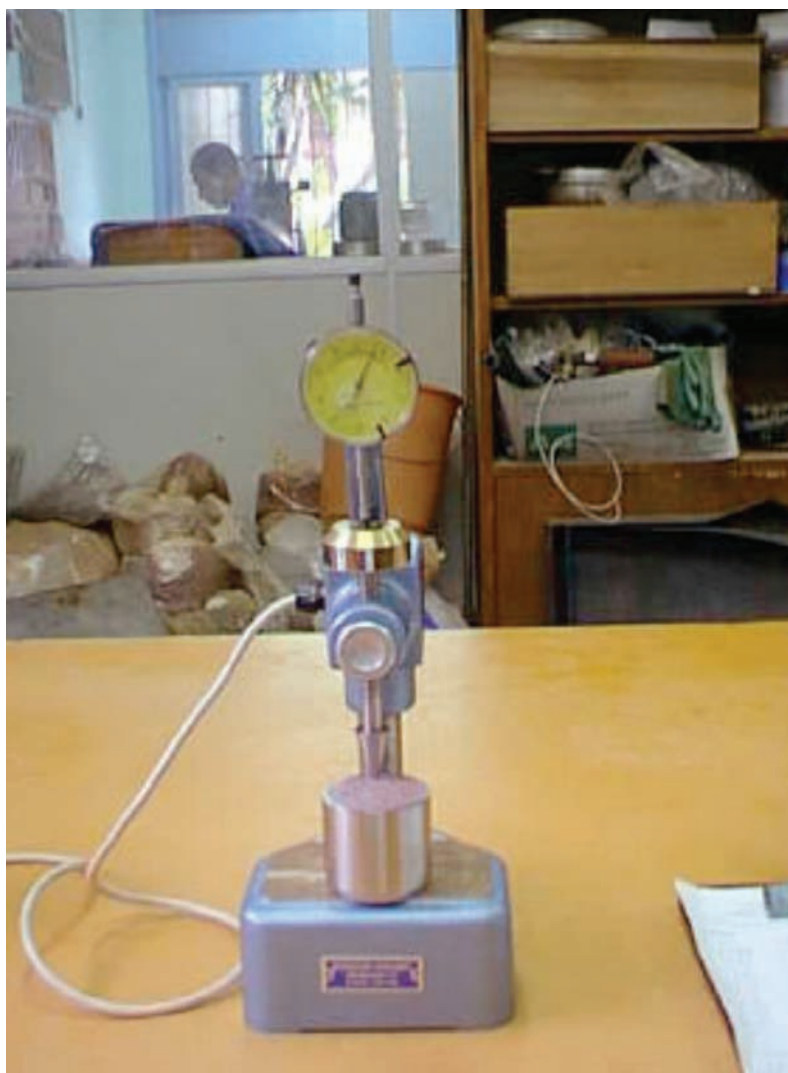
O ensaio foi realizado simultaneamente para os três solos, sendo utilizadas amostras indeformadas, com formato cúbico de aproximadamente 6cm de lado, moldadas na umidade natural.

#### **3.2.3 – Ensaio de penetração de cone de laboratório**

Trata-se de uma proposta de avaliação da erodibilidade dos solos, considerando-se como critério a relação entre as penetrações de um cone padronizado, em amostras em condições naturais e saturadas (Figura 2). A proposta e metodologia do ensaio foram desenvolvidas por Alcântara (1997).

Na realização dos ensaios são utilizadas amostras indeformadas, retiradas de blocos com o uso de anéis de cravação. Para saturar os corpos-de-prova os mesmos foram colocados sobre pedras porosas saturadas, até que se verificasse o surgimento de água em seus topos.

Neste ponto, destaca-se o comportamento do solo verde, que ao absorver água passou a expandir, chegando a sair do anel, ficando saliente cerca de 1cm. Em um dos corpos-de-prova deste material, surgiram fissuras após a expansão, motivo pelo qual o mesmo foi rejeitado, não sendo ensaiado.



**Fig. 2** – Equipamento utilizado para ensaio de penetração de cone de laboratório.

### ***3.2.4 – Ensaio de sucção***

Marinho (1997) afirma que nos solos não saturados, as características mecânicas “são controladas, entre outras coisas, pela pressão (relativa) negativa na água intersticial. Esta pressão é dada pela diferença entre a pressão atmosférica (ou pressão no ar) e a pressão na água, sucção matricial”.

Para a medição da sucção de um solo existem diversos métodos disponíveis. Estes consistem, resumidamente, em sensores que interagem com o solo até que o sistema entre em equilíbrio, permitindo então, por meio de uma calibração, a conversão das medições feitas para valores da grandeza desejada. Nesta pesquisa, foi adotado o método do papel filtro.

Marinho (1997) explica que “o estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém umidades diferentes. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para obtenção da correta sucção”.

Neste trabalho, optou-se pela realização de ensaios pelo método do papel filtro em contato físico com o solo, utilizando-se papéis Whatman no. 42, adotando-se para o mesmo uma curva de calibração da literatura, mais especificamente a proposta por Chandler *et al.* (1992).

No caso do papel filtro em contato direto com o solo, a sucção medida é a matricial, a qual exige um tempo de equilíbrio de sete dias, o qual foi padronizado para todas as amostras.

Conforme recomendado por Marinho (1994), o papel filtro foi cuidadosamente colocado na amostra e o conjunto foi envolvido com filme plástico, por sua vez lacrado com fita adesiva, buscando-se assim uma máxima vedação e mínima evaporação.

Decorrido o tempo de equilíbrio, os papéis foram retirados das amostras procurando-se atender a recomendação de que esta operação fosse realizada em no máximo cinco segundos, para evitar evaporação de água do papel.

Os sacos plásticos com os papéis úmidos foram pesados em balança com acurácia de 0,0005g. Os papéis foram então removidos dos sacos plásticos e deixados secando em estufa a 105°C, por pelo menos duas horas (tempo considerado normalmente suficiente por Marinho, 1997). Uma vez secos foram recolocados nos respectivos sacos (novamente em um tempo máximo de cinco segundos, desta vez para evitar que os papéis absorvessem água) e pesados.

Com a diferença de pesos obteve-se a umidade de cada papel e pela calibração do mesmo determinou-se a sua sucção. Os sacos plásticos utilizados na pesagem após a secagem dos papéis foram os mesmos utilizados na pesagem quando dos papéis úmidos.

### 3.2.5 – Ensaio de resistência à tração (Método Brasileiro)

A erosão é um processo constituído basicamente por duas etapas: o destacamento e o transporte das partículas. Assim sendo, neste trabalho optou-se pela realização de ensaios de resistência à tração do solo por se acreditar que este parâmetro esteja diretamente ligado à primeira etapa do processo, ou seja, à facilidade que o solo apresentará em ter suas partículas destacadas umas das outras.

Presumindo-se que tal facilidade esteja relacionada à umidade do solo, executaram-se ensaios com diversas amostras, variando-se aquela característica, de modo a se abranger toda a faixa de saturação dos materiais, desde a umidade higroscópica até a umidade de saturação total.

O ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro consiste no carregamento de um corpo de prova cilíndrico, no qual são aplicadas cargas de compressão em duas posições diametralmente opostas.

Fonseca (1996) diz que teoricamente a tensão de tração,  $\sigma_t$ , é constante e dada por:

$$\sigma_t = \frac{2 P}{H D \pi} \quad (1)$$

onde:

P – carga máxima de compressão;

H – espessura da amostra;

D – diâmetro da amostra.

Maciel (1991) explica que esta relação “não é rigorosamente adequada para materiais que apresentam diferentes módulos de elasticidade na compressão e na tração, como é o caso de solos”. Entretanto, como o objetivo principal deste trabalho era qualitativo, relacionando os resultados dos diferentes solos com seus comportamentos à erosão observados em campo, optou-se pelo uso da relação.



Para realização dos ensaios procurou-se seguir as mesmas características e procedimentos adotados por Maciel (1991). Assim, foram utilizadas amostras com 7,12cm de diâmetro por 2,00cm de espessura. As amostras encontravam-se com elevado grau de saturação, o que possibilitou que a variação no teor de umidade fosse realizada por simples “secagem ao ar”. Apenas a velocidade de aplicação de carga foi alterada em relação à proposta de Maciel (1991), adotando-se aqui 0,6mm/min, a fim de tornar o ensaio mais rápido e assim evitar que as amostras perdessem umidade.

A fim de se tentar estabelecer uma relação entre a resistência à tração do solo e sua umidade, foram realizados de dez a vinte ensaios para cada solo. Em cada ensaio utilizava-se um provete com umidade diferente, de modo a se obter um par de pontos. O conjunto de todos os pares, de cada solo, puderam então ser plotados em gráficos, os quais buscavam representar a tendência de comportamento dos respectivos materiais.

## 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 – Ensaios de caracterização dos solos

Os resultados dos ensaios de caracterização realizados para os três solos estudados são apresentados nos Quadros 1, 2 e 3.

**Quadro 1** – Resumo dos índices físicos e mineralogia para os três solos.

Solo	Índices físicos							Mineralogia da fração fina
	w <sub>nat</sub> (%)	w <sub>h</sub> (%)	G <sub>s</sub>	γ (g/cm³)	e	S (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm³)	
Verde	23,87 a 28,48 (25,3)	7,04 a 7,13 (7,09)	2,687	1,898 a 2,017 (1,976)	0,66 a 0,78 (0,7)	86,9 a 99,79 (96,6)	1,506 a 1,617 (1,577)	Caulinita, esmectita e ilita
Branco	17,21 a 28,64 (22,76)	1,97 a 2,04 (2,01)	2,614	1,731 a 1,944 (1,879)	0,64 a 0,81 (0,71)	63,68 a 95,82 (84,2)	1,446 a 1,594 (1,531)	Caulinita
Roxo	20,52 a 24,05 (22,1)	6,01 a 6,09 (6,05)	2,681	1,977 a 2,014 (1,999)	0,62 a 0,68 (0,64)	89,38 a 95,16 (93,1)	1,594 a 1,661 (1,637)	Caulinita
Obs. - Entre parênteses estão os valores médios para cada índice.								

**Quadro 2** – Resumo da granulometria de cada solo (com uso de defloculante).

Solo	Areia (%)				Silte (%)	Argila (%)	Total de finos (%)
	Grossa	Média	Fina	Total			
Verde	0	1	3	4	20	76	96
Branco	9	36	11	56	12	32	44
Roxo	3	14	19	36	23	41	64

**Quadro 3** – Resultados dos limites de consistência dos solos.

Solo	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Verde	81,7	32,6	49,1
Branco	49,4	22,9	26,4
Roxo	65,4	35,1	30,3

#### 4.2 – Ensaio de desagregação

Aos 5 minutos de duração o solo branco já estava totalmente desagregado, formando uma pilha de material com grãos soltos. Neste momento, o solo roxo apresentava desprendimento de apenas algumas partículas, enquanto o verde já indicava razoável desagregação.

Com cerca de 30 minutos, o solo roxo permanecia inalterado, enquanto o verde já se encontrava bastante desagregado, porém diferentemente do branco, desprendendo grumos de partículas.

Aos 50 minutos começaram a surgir fissuras no solo roxo, sub-horizontais e sub-verticais, com aparente tendência de foliação. Neste ponto do ensaio o solo verde se encontrava com a forma praticamente desfeita (Figura 3).



**Fig. 3** – Aspecto dos solos decorridos 50 minutos do ensaio de desagregação.

Com 2 horas de ensaio, as fraturas da amostra roxa se encontravam bastante abertas, porém, sem ocasionar em uma perda do formato cúbico. O solo verde não mantinha mais nenhuma preservação da forma original, tendo-se desagregado totalmente em grumos de partículas. A partir de então não ocorreram mais alterações nos comportamentos dos solos até que o ensaio completasse 24 horas e fosse considerado encerrado.

De acordo com resultados obtidos por Rego (1978), Ferreira (1981) e Santos (1997) o ensaio de desagregação pareceu ser representativo da erodibilidade de solos.



### 4.3 – Ensaio de penetração de cone

Para cada solo foram ensaiados três corpos-de-prova, adotando-se ao final a média dos valores obtidos, novamente de acordo com as recomendações originais.

Conforme preconizado para o ensaio, foram utilizadas amostras indeformadas, retiradas de blocos com uso de anéis de cravação. Para a etapa em condição saturada cada corpo de prova foi colocado sobre pedra porosa saturada até que se verificasse surgimento de água em seu topo.

Os resultados do ensaio de cone para os três solos indicaram os valores médios para a penetração natural ( $P_{nat}$ ) e para a penetração saturada ( $P_{sat}$ ) apresentados no Quadro 4.

**Quadro 4** – Resultados dos ensaios de Cone de Laboratório obtidos para os solos em estudo.

SOLO	$P_{nat}$ (mm)	$P_{sat}$ (mm)	$0,67 P_{sat}/P_{nat}$
VERDE	2,897	8,312	1,922
BRANCO	4,323	6,466	1,002
ROXO	5,421	5,653	0,698

Uma das propostas feitas por Alcântara (1997) considera que os solos com problemas de erosão apresentam a relação  $0,67 P_{sat}/P_{nat} > 1$ .

### 4.4 – Ensaio de sucção

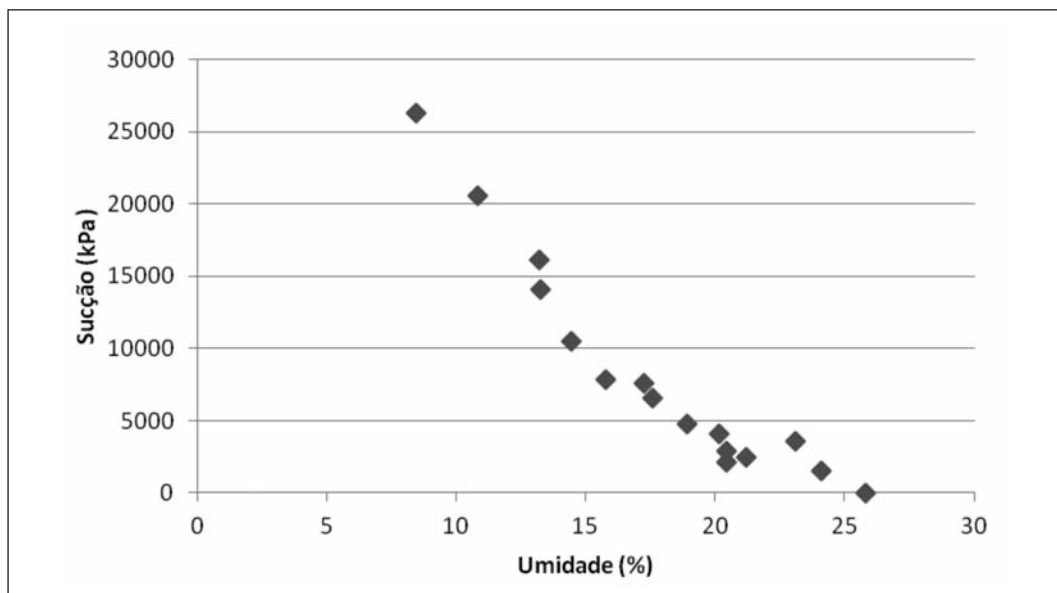
Todos os solos apresentavam valores médios de grau de saturação bastante elevados, com amostras que atingiam aproximadamente 95%. Por este motivo optou-se por variar a umidade das amostras apenas pelo processo de secagem das mesmas. As curvas características de cada solo são apresentadas nas Figuras 1 a 3.

Para todos os solos foram adotados pontos “teóricos”, correspondentes ao grau de saturação de 100%, que teria uma sucção nula. Os referidos pontos foram estimados por meio de cálculos, considerando-se que não havia variação de volume dos solos, uma vez que não foi observada re-tracção das amostras durante o processo de secagem das mesmas.

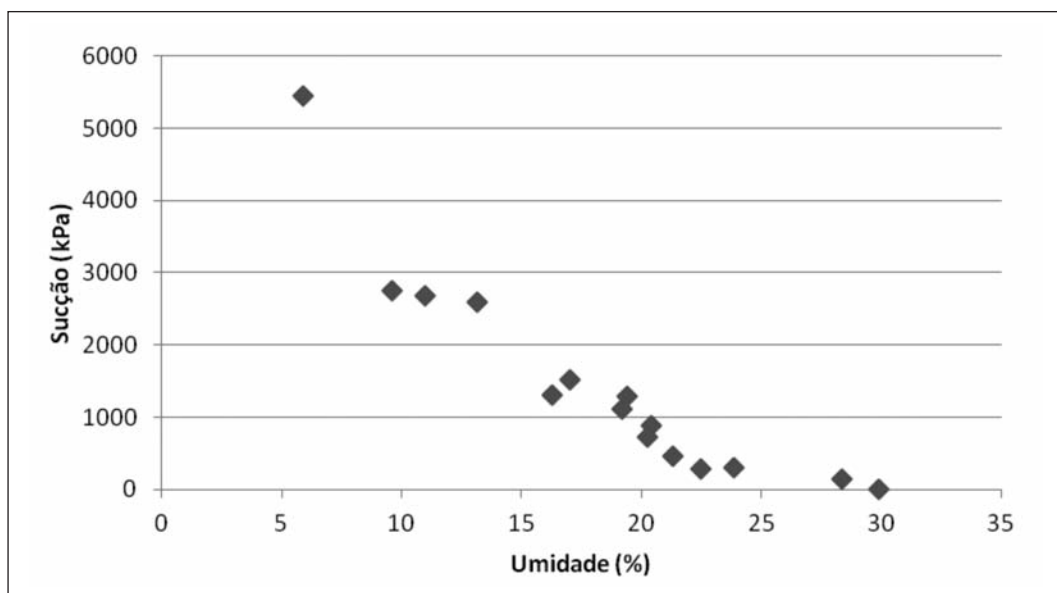
O solo verde apresenta os maiores valores de sucção dentre os três materiais. Tal fato está em acordo com o que se podia prever, pois a presença de esmectita neste solo certamente implicaria em sucções elevadas. Segundo Bastos *et al.* (1998), sucções elevadas também podem ser esperadas em solos com comportamentos muito plásticos e altos limites de liquidez, o que ocorre neste caso. Os valores encontrados indicaram sucções mínimas da ordem de 1500kPa para o solo com 24,1% de umidade ( $S=98\%$ ). Às menores umidades, por volta de 8,4% ( $S=33\%$ ) determinou-se sucções de 26000kPa (Figura 4).

O solo branco apresentou as menores sucções dentre os três materiais. Estes resultados podiam ser previstos pela granulometria do mesmo, visto que era mais grosseira que a dos demais, com o menor teor de argila e o maior de areia. Mineralogicamente, a presença apenas de caulinita também não indicaria maiores sucções. Deve-se ressaltar que tais resultados não são exatamente baixos, porém, comparativamente aos dos outros materiais, encontram-se num nível bastante inferior. As sucções ficaram, então, entre 150kPa para uma umidade de 28,7% ( $S=94\%$ ) e 5500kPa para uma umidade de 5,9% ( $S=26\%$ ) (Figura 5).

O solo roxo também apresentou sucções elevadas, as quais merecem ainda mais destaque se considerar-se que o material não apresenta esmectita ou outro argilomineral que as justifiquem, sendo de se esperar portanto que os valores fossem menores. As características de plasticidade do solo ( $IP=30\%$ ), entretanto, poderiam ser consideradas indicativas de altas sucções. Obteve-se para



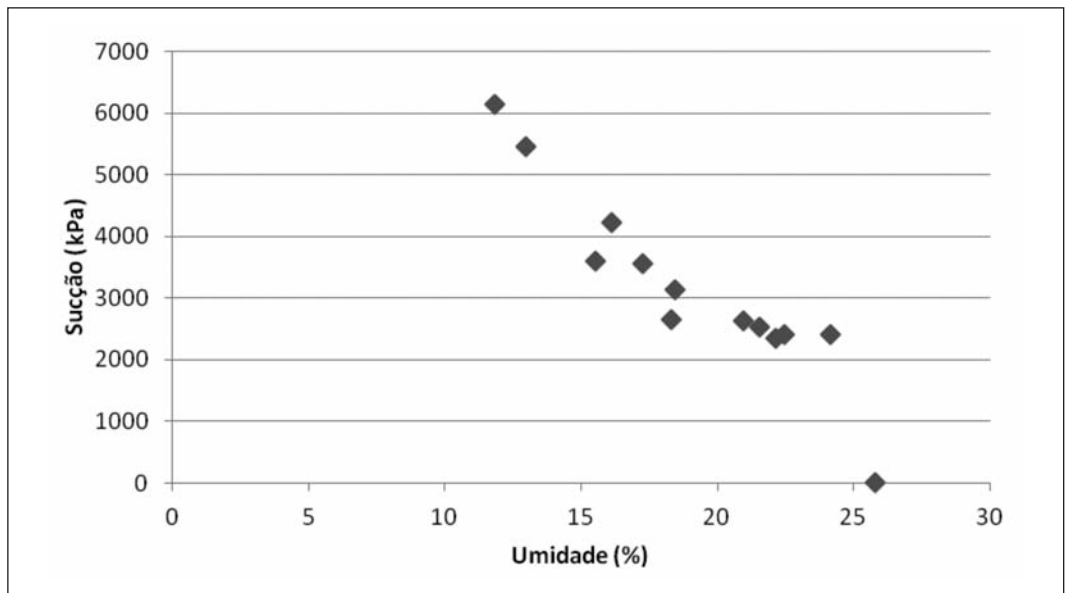
**Fig. 4** – Curva característica de sucção do solo verde.



**Fig. 5** – Curva característica de sucção do solo branco.

o mesmo resultados a partir de 2400kPa, para uma umidade de 24% (S=90%). As menores umidades, por volta de 11% (S=43%) forneceram sucções de aproximadamente 6100kPa (Figura 6).

Note-se que a relação entre sucção e plasticidade se evidencia nestes solos. Os três materiais são altamente plásticos e todos atingem sucções consideráveis. Entretanto, o que apresenta menor índice de plasticidade (branco) também apresenta sucção significativamente menor que a do solo verde, o qual é mais plástico. O solo roxo, por sua vez, apresenta valores intermediários para as duas propriedades.

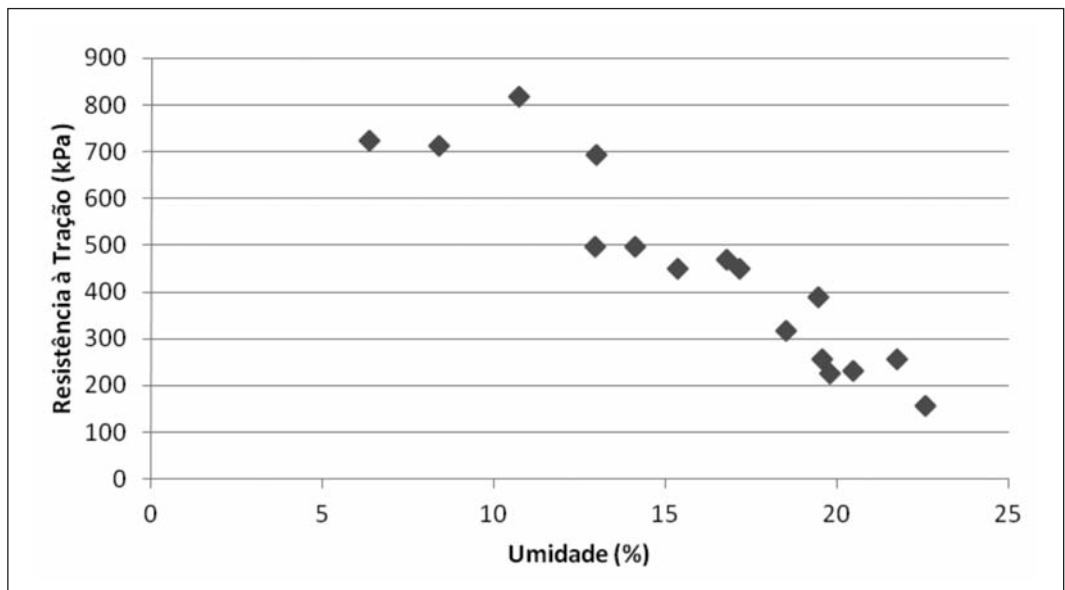


**Fig. 6** – Curva característica de sucção do solo roxo.

#### 4.5 – Ensaio de resistência à tração (ensaio de compressão diametral)

Nas Figuras 7 a 9 são apresentados os gráficos “Resistência à tração vs. Umidade” de cada um dos materiais.

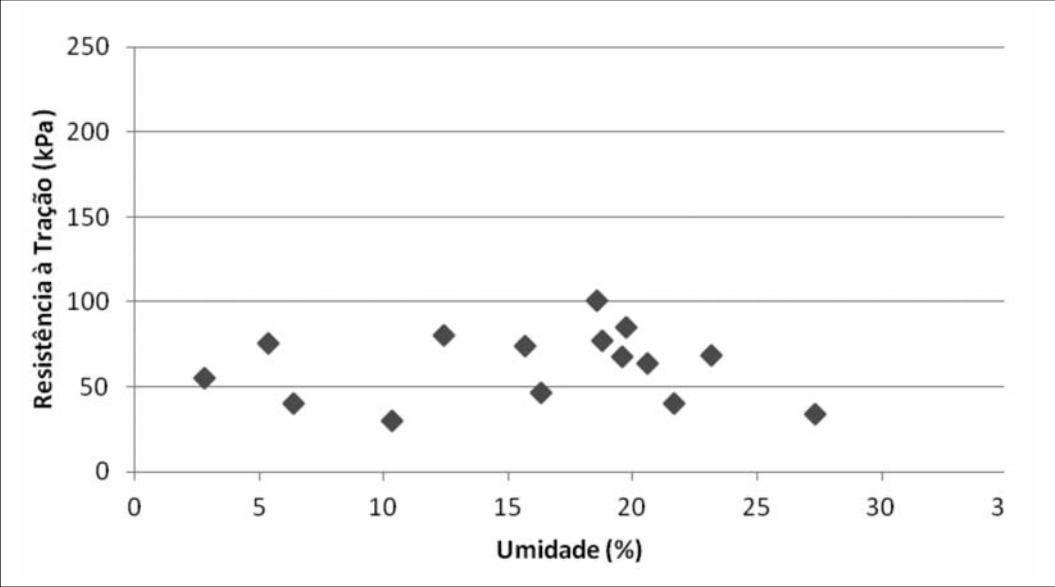
Como era esperado, o solo verde é o que apresenta maior resistência, com valores mínimos de aproximadamente 157kPa para uma umidade de 22,5% (saturação de 92%), até um máximo verificado de 819kPa para a umidade de 10,7% (saturação de 46%) (Figura 7). Estes valores elevados



**Fig. 7** – Resistência à tração (kPa) vs. Umidade (%) (solo verde).

podem ser justificados pela granulometria do mesmo, a qual apresenta elevado percentual de argila e silte, que à medida que secam ocasionam um aumento da coesão.

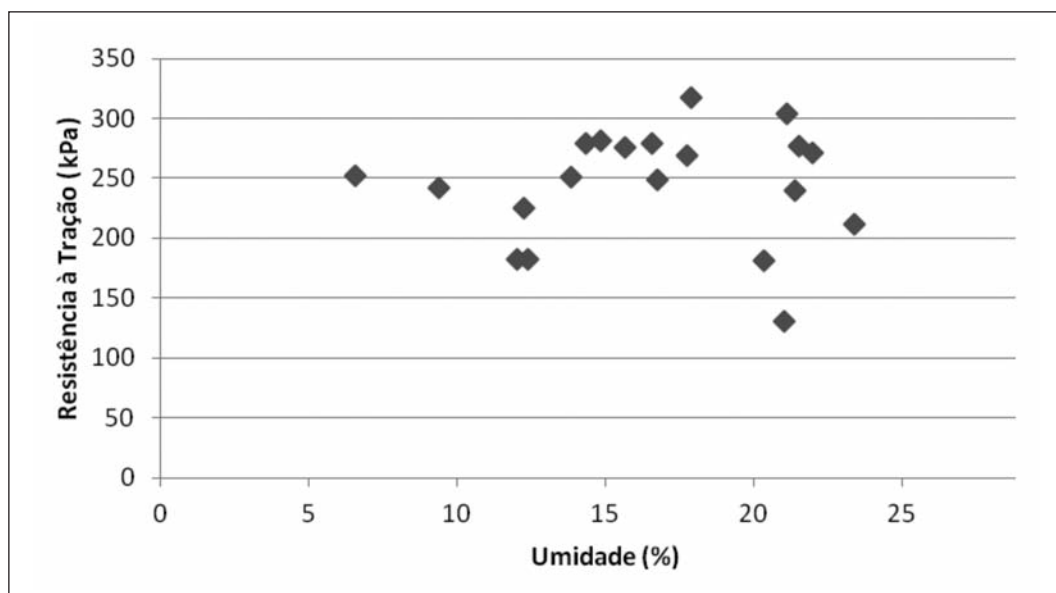
Os resultados do solo branco foram os que apresentaram menores valores de resistência, variando entre um mínimo de 34kPa para 27,5% de umidade (saturação de 91,5%), até um máximo de 101kPa para 18,5% de umidade (saturação de 64,5%) (Figura 8). Tais resultados também estão de acordo com o previsto. Assim como no que se refere à sucção, a melhor justificativa para os mesmos também parece ser a granulometria, a qual apresenta a menor quantidade de argila e maior porcentagem de areia dentre os solos em questão. Deve-se ressaltar que os pontos apresentaram-se bastante dispersos, com a tendência de comportamento parecendo indicar um aumento de resistência com a diminuição da umidade, até um “ponto ótimo” a partir do qual apresenta um decréscimo, chegando a apresentar 30kPa para 10,3% de umidade.



**Fig. 8** – Resistência à tração (kPa) vs. Umidade (%) (solo branco).

Por fim, o solo roxo foi o que apresentou resultados mais dispersos, sendo difícil a visualização de uma tendência no seu comportamento. Ao que parece, ocorre também um aumento da resistência com a diminuição da umidade até um ponto máximo. A partir deste ponto, entretanto, a resistência indica uma estabilização, com ligeira tendência de diminuição.

Quanto à ordem de grandeza dos resultados para este material, pode-se dizer que o mesmo apresenta valores intermediários em relação aos demais, ficando entre 130,4kPa para 21% de umidade (saturação de 80,65%), atingindo 317kPa para umidade de 17,8% (saturação de 73,7%) (Figura 9).



**Fig. 9** – Resistência à tração (kPa) vs. Umidade (%) (solo roxo).

#### 4.6 – Potencial de erosão dos solos

Procura-se estabelecer neste item a correlação entre as propriedades analisadas e o potencial de erosão dos solos, avaliado com base nas observações de campo e nos resultados dos ensaios de desagregação e de penetração de cone. Para isto, faz-se uma interpretação dos resultados obtidos, comparando-os com outros resultados da literatura, com as condições de campo e com os resultados dos ensaios acima referidos.

As comparações feitas neste item considerarão, então, que em situações de campo, com os solos não estando submersos/saturados, o solo verde será o menos erodível, seguido do roxo e por fim o branco, avaliado como potencialmente erodível.

De acordo com Morgan (1986), ilita e esmectita conferem aos solos maior expansibilidade que a caulinita e os agregados que formam são menos estáveis que os formados por este último argilomineral citado. Por essas características, a presença destes argilominerais (ilita e esmectita) em um solo indicariam uma maior erodibilidade do mesmo.

Por outro lado, estudos realizados por Fácio (1991) e Lima (1999) identificaram a caulinita como argilomineral predominante nos solos de diversas voçorocas, o que parece indicar que a mesma também seja bastante susceptível à erosão.

Pelos resultados obtidos na análise dos solos em estudo e confrontando-se aqueles com os relatos da literatura, percebe-se que a simples análise da mineralogia da fração fina não é um parâmetro que possa ser adotado como bom indicador do potencial de erosão de um solo.

Estudos realizados por Santos (1953) e Santos e Castro (1966) levaram à proposta de um critério de avaliação segundo o qual solos de comportamento bom ou regular teriam porcentagem de material passante na peneira nº.40 entre 49% e 96%. Tais porcentagens, para os solos em estudo, são de 99,9% para o verde, 96% para o roxo e 85% para o branco.

Os resultados obtidos demonstram que tal critério não seria adequado para os solos em questão, pois a porcentagem passando na peneira nº.40 indicaria que o solo branco teria bom comportamento, o solo roxo estaria no limite de separação (portanto, seu comportamento não seria claro ou

bem definido) e o verde seria susceptível à erosão. Comparando-se a proposta com as observações de campo, conclui-se que tal critério não é satisfatório para os solos em questão, pois apontaria tendências opostas às verificadas “in loco”.

As porcentagens de argila, silte e areia, podem ser apresentadas em um gráfico demonstrativo de texturas. Na Figura 10 estão representados os solos em estudo, junto a outros solos relatados na literatura (Fonseca e Ferreira, 1981; Fácio, 1991; Santos, 1997; Lima, 1999), estes últimos relacionados às condições de erosão descritas pelos respectivos autores.

O gráfico parece indicar uma tendência de concentração dos solos muito erodíveis na região de mais de 50% de areia e menos de 50% de argila, justamente onde se localiza o solo branco, aqui considerado o mais erodível dentre os três em estudo. Faz-se então uma proposta de separação de duas zonas, indicando a provável tendência de comportamento dos solos.

De acordo com os critérios propostos por Santos e Castro (1966), solos com bom comportamento apresentam  $LP \leq 32\%$  e  $IP \leq 17\%$ . Considerando-se LP, o solo branco teria bom comportamento, enquanto os outros dois teriam mau comportamento, estando porém muito próximos do limite de separação adotado como critério. Entretanto, considerando-se IP, todos os solos apresentam mau comportamento, com valores muito superiores aos valores limites adotados.

O Quadro 5 apresenta os resultados de LP e IP de solos estudados por Santos (1997), Fácio (1991), Lima (1999) e Ferreira e Fonseca (1981) com os respectivos potenciais de erodibilidade dos solos identificados por tais autores.

**Quadro 5** – Valores de IP e LP encontrados na literatura relacionados com a erodibilidade.

Solo	IP	LP
JB-4: Pouco erodível (Santos, 1997)	10	46
VC-5: Muito erodível (Santos, 1997)	8	44
VP-5: Muito erodível (Santos, 1997)	NP	47
Distrito 8,5m: Pouco erodível (Lima, 1999)	4,2	20
Distrito 7,0m: Muito erodível (Lima, 1999)	9,9	17,1
Distrito 3,0m: Muito erodível (Lima, 1999)	16,2	30,1
Ceilândia 1: Muito erodível (Fácio, 1991)	NP	33,8
IC: Muito erodível (Fonseca e Ferreira, 1981)	NP	42
IA: Muito erodível (Fonseca e Ferreira, 1981)	26	63
Colúvio: Pouco erodível (Fonseca e Ferreira, 1981)	29	61

Os valores apresentados não indicam nenhuma tendência de relação da erosão com os referidos índices, em boa parte dos casos discordando inclusive da proposta de Santos e Castro (1966).

Com os valores das granulometrias e dos limites, pôde-se obter a classificação dos solos pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos. Segundo Gray e Leiser (1989), a erodibilidade seria:

$$ML > SM > SC > MH > OL > CL > CH > GM > SW > GP > GW \quad (2)$$

Os solos aqui estudados são classificados como CH (verde), MH (roxo) e SC (branco). As mesmas indicariam uma tendência de erodibilidade maior do solo branco, seguido pelo roxo e sendo o solo verde o menos susceptível, o que encontra-se em consonância com as observações de campo.



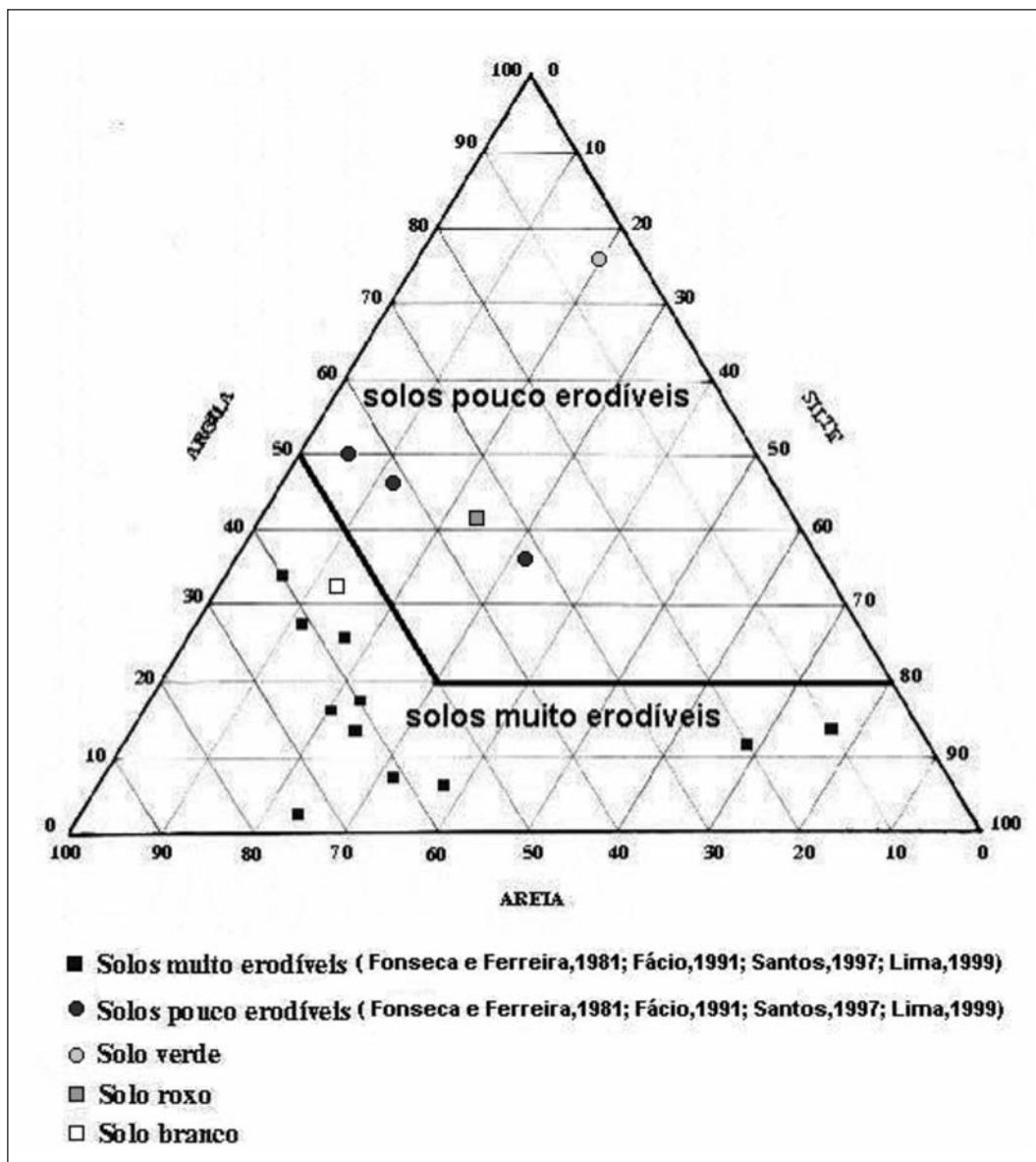


Fig. 10 – Triângulo de texturas com proposta de separação de faixas indicativas de susceptibilidade à erosão.

Os resultados do ensaio de desagregação para os solos estudados neste trabalho indicam que o solo branco é o mais erodível, tendo desagregado completamente em um período muito curto, de cerca de 5 minutos. O solo verde também demonstra erodibilidade semelhante, tendo-se desagregado em um período de 30 minutos, o qual também pode ser considerado curto em relação à duração total do ensaio, que é de 24 horas. Já o solo roxo apresentou-se pouco susceptível à erosão, não se desagregando, tendo como reações ao ensaio uma expansão e o surgimento de fissuras.

Os resultados do ensaio de penetração de cone, por sua vez, também indicaram que o solo roxo não é erodível. O solo branco posicionou-se muito próximo do limite de separação entre os solos,

tendendo para a zona de mau comportamento, conforme se pode verificar pelo valor da relação  $0,67 P_{sat}/P_{nat}$ . O solo verde, novamente, apresentou comportamento classificável como de mau comportamento à erosão.

Comparando-se os resultados dos ensaios de desagregação e de penetração de cone dos solos branco e roxo com as observações de campo, os mesmos encontram-se em concordância. O solo verde, porém, aparentava em campo possuir uma maior resistência à erosão, o que não foi confirmado pelos ensaios.

Para o solo verde, a completa desagregação ocorrida, bem como a relação entre  $P_{sat}$  e  $P_{nat}$  encontrada, podem estar relacionadas à condição de saturação do solo combinada à sua mineralogia, cuja análise indicou a presença de esmectita. Este argilomineral faz com que o solo, quando saturado, se apresente dispersivo / expansivo e assim, mais erodível. Esta situação poderia explicar seu comportamento à submersão. Por outro lado, quando não saturado, a esmectita acarreta maior sucção ao solo, conferindo-lhe uma “maior resistência”. Tal fato, confirmado pelos ensaios de curva característica e resistência à tração, explicaria o comportamento de campo do solo.

#### 4.7 – Resistência à tração vs. Sucção

Uma vez que se dispunha de ensaios que definiam gráficos Sucção vs. Umidade e Resistência à tração vs. Umidade, foram desenvolvidos gráficos relacionando Resistência à tração vs. Sucção.

O objetivo desta determinação era de se verificar a ocorrência de tendências de comportamento dos solos para tal relação e, havendo esta tendência, definir possível correlação entre ela e o comportamento do material quanto à erosão.

Para estabelecer a relação desejada, foram definidas equações que representassem a linha de tendência dos solos para as curvas Sucção vs. Umidade. Em todos os casos conseguiu-se obter equações muito satisfatórias, conforme apresentadas a seguir:

Solo verde:

$$\text{sucção} = 1,1058 w^3 + 25,649 w^2 - 3365,4 w + 51852 \quad (R^2 = 0,98) \quad (3)$$

Solo branco:

$$\text{sucção} = -0,4114 w^3 + 31,955 w^2 - 907,3 w + 9499,9 \quad (R^2 = 0,96) \quad (4)$$

Solo roxo:

$$\text{sucção} = -5,7131 w^3 + 327,43 w^2 - 6398,2 w + 45637 \quad (R^2 = 0,94) \quad (5)$$

Com estas equações, podia-se então obter os valores de sucção para cada umidade desejada, passando-se assim dos pontos (tração, umidade) para pontos (tração, sucção).

Os pontos obtidos foram plotados, resultando no gráfico apresentado na Figura 11. No mesmo gráfico é ressaltada a tendência de concentração dos solos em faixas, as quais sugere-se aqui que podem vir a ser adotadas como um outro indicativo da tendência de comportamento à erosão do solo.

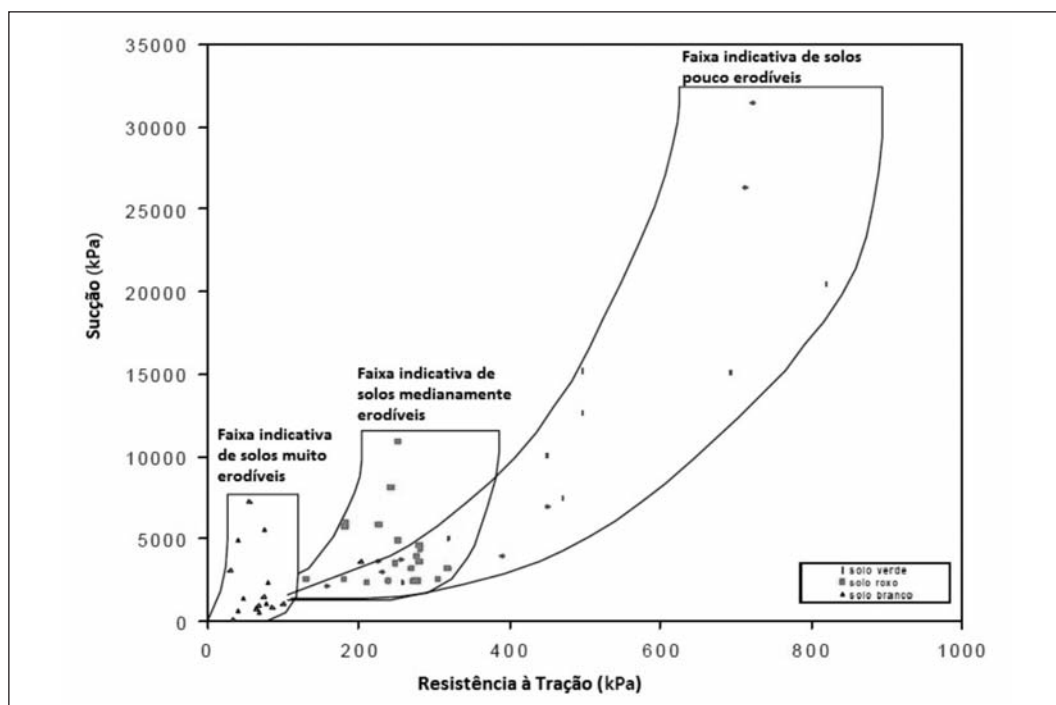


Fig. 11 – Resistência à Tração (kPa) vs. Sucção (kPa): faixas indicativas de erodibilidade dos solos.

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, características geotécnicas como plasticidade, índices físicos, etc., analisadas isoladamente não demonstraram, para os solos aqui estudados, tendências que pudessem estabelecer claras correlações com a erodibilidade dos solos.

Dentre as diversas propostas de correlações apresentadas na literatura, apenas a que indica hierarquia de erodibilidade com base na identificação dos solos pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos mostrou-se adequada para os solos aqui estudados. Além dessa, a textura do solo também demonstrou possuir relação direta com a erodibilidade, sendo feita neste trabalho, então, uma proposta de separação de faixas indicativas de maior e menor erodibilidade no triângulo de texturas.

Uma característica dos solos que parece ter importante papel na erodibilidade é a sucção. Pode-se imaginar que a erodibilidade do solo tenha comportamento inverso à sucção, ou seja, quanto maior a sucção menor a susceptibilidade do solo à erosão.

Tal verificação indica uma boa explicação para os comportamentos distintos dos solos observados em campo, pois, de fato, os três apresentaram níveis de sucção diferentes. Estes níveis de sucção observados, menor para o solo branco, intermediário para o roxo e maior para o verde, representam bem as observações de campo, segundo as quais os mesmos solos apresentam-se mais erodido, medianamente erodido e não erodido, respectivamente.

Da mesma forma que a sucção, a resistência à tração também demonstra relação direta com o processo erosivo, porém, a literatura não apresenta quantidade expressiva de pesquisas sobre esta relação. Na verdade, não foi encontrada nenhuma referência a outras pesquisas neste sentido, sendo talvez este trabalho o primeiro a abordá-la.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração também apresentaram níveis distintos para os três materiais, sendo alta para o solo muito argiloso (verde), média para o argiloso (roxo) e baixa para o franco-argilo-arenoso (branco). Os mesmos parecem, portanto, tratar-se de um bom indicativo do comportamento de campo, com maiores erodibilidades quanto menores forem as resistências à tração.

Em uma comparação qualitativa das resistências à tração dos solos estudados com os valores do fator de erodibilidade dos solos (fator K), tais resultados demonstram-se em concordância, uma vez que tal fator seria da ordem de 0,2 para o solo muito argiloso e de 0,27 para o solo franco-argilo-arenoso (branco). O solo roxo teria posição no triângulo textural na área delimitada como argiloso (cujo fator K seria 0,2), porém muito próximo ao limite de separação para a área delimitadora de solos franco-argilosos (cujo K seria 0,28). Adotando-se, então, a recomendação de que para solos próximos às linhas de separação de duas texturas o mais adequado seria estimar-se o fator K como uma média dos respectivos fatores, teríamos que para este solo o fator K seria de aproximadamente 0,24.

Pela análise conjunta de campo e laboratório, conclui-se que em situações de campo, com os solos não estando submersos/saturados, o solo branco seria o mais erodível, podendo ser considerado potencialmente susceptível ao fenômeno, seguido do solo roxo e, por fim, o solo verde.

No que diz respeito à confiabilidade dos métodos aqui em discussão, pôde-se concluir que os mesmos apresentam resultados de boa qualidade, sendo satisfatoriamente representativos do comportamento que se pode esperar em campo para os solos de uma maneira geral. Trata-se portanto de ensaios muito úteis, uma vez que apresentam a vantagem de serem de execução muito simples e fácil. Ressalta-se apenas a exceção dos solos com comportamento dispersivo, característica que demonstrou poder levar a conclusões em laboratório equivocadas quando comparadas com o comportamento real dos materiais no campo.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcântara, M.A.T. (1997). *Estudo da Erodibilidade de Alguns Solos do Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, EESC/USP, SP.
- Amador, E.S. (1980). *Unidades Sedimentares Cenozóicas do Recôncavo da Baía de Guanabara (Folhas Petrópolis e Itaboraí)*. An. Acad. Brasil. Ciências, Rio de Janeiro, v. 52, n. 4, p. 743-761, dez. 1980.
- Amador, E.S. (1996). *Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos : Homem e Natureza*. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, UFRJ, RJ.
- Bastos, E.G.; Ferreira, R.N.; Jucá, J.F.T. (1998). *Contração por Ressecamento de uma Argila Expansiva*. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v.1, Brasília, DF.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. (2008). *Conservação do Solo*. 6ª ed. São Paulo: Ícone. 355p.
- Chandler, R.J.; Crilly, M.S.; Montgomery-Smith, G. (1992). *A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings*. Proc. of the Institute of Civil Engineering, 92-n.2.
- Fácio, J.A. (1991). *Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF.
- Ferreira, C.S.M. (1981). *Erosão - Investigações de Campo e de Laboratório Desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias*. 2º Simpósio Sobre Controle de Erosão, São Paulo, SP.

- Fonseca, A.J.P.V. (1996). *Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para Dimensionamento de Fundações Directas*. Tese de Doutorado, Universidade do Porto.
- Fonseca, A.M.M.C.C.; Ferreira, C.S.M. (1981). *Metodologia para Determinação de um Índice de Erodibilidade de Solos*. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- Gray, D.H.; Leiser, A.T. (1989). *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- Lima, M.C. (1999). *Contribuição ao Estudo do Processo Evolutivo de Boçorocas na Área Urbana de Manaus*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF.
- Maciel, I.C.Q. (1991). *Aspectos Microestruturais e Propriedades Geomecânicas de um Perfil de Solo Residual de Gnaiss Facoidal*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ.
- Marinho, F.A.M. (1994). *Medição de Sucção com o Método do Papel Filtro*. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v.2, Foz do Iguaçu, PR.
- Marinho, F.A.M. (1997). *Medição de Sucção em Solos*. 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, RJ.
- Meis, M.R.M.; Amador, E.S. (1972). *Formação Macacu: Considerações a respeito do Neo-Cenozóico da Baía de Guanabara*. An. Acad. Brasil. Ciências, Rio de Janeiro, v. 44, n. 3/4, p.602, dez. 1972.
- Meis, M.R.M.; Amador, E.S. (1977). *Contribuição ao Estudo do Neocenozóico da Baixada da Guanabara, Formação Macacu*. Revista Brasileira de Geociências, v. 7, n. 2, p. 150-174, jun. 1977.
- Morgan, R.P.C. (1986). *Soil Erosion and Conservation*. Longman Group, Inglaterra.
- Rego, J.J.V. (1978). *Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaiss*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Santos, M.P.P. (1953). *A new soil constant and its applications*. Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.1, Zurique, Suíça.
- Santos, M.P.P.; Castro, E. (1966). *Soil Erosion in Roads*. Memória N°.282, LNEC, Lisboa.
- Santos, R.M.M. (1997). *Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF.
- Silva, A.S. (2007). *Análise Morfológica dos Solos e Erosão*. In: A.J.T Guerra, A.Soaes da Silva, R.G.M. Botelho (Eds.) *Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos, Temas e Aplicações*. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, pp.101-126.