

A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências

Cezar Augusto Burkert Bastos¹, Jarbas Milititsky² & Wai Gehling²

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

²Escola de Engenharia – UFRGS, Porto Alegre, RS

RESUMO: A erodibilidade, particularizada como a susceptibilidade a erosão hídrica por fluxo superficial concentrado, é uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade pelo grande número de variáveis intervenientes. Estudada por diferentes áreas do conhecimento (Agronomia, Hidráulica, Geologia de Engenharia e Engenharia Geotécnica), tem no meio geotécnico a maior lacuna na sua quantificação e entendimento dos mecanismos envolvidos. O artigo traz uma revisão das pesquisas geotécnicas referentes a avaliação da erodibilidade dos solos destacando os avanços recentes e tendências futuras.

1. INTRODUÇÃO

Erosão, termo que provém do latim “erodere” cujo significado é corroer, tem variadas definições encontradas na literatura. Em uma definição abrangente, podemos considerar erosão como um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos, tais como as geleiras, os rios, os mares, o vento ou a chuva.

A erosão constitui um processo natural. É considerada um agente geológico que provoca a modificação das paisagens terrestres e, como tal, é lento e medido pelo tempo geológico. A interferência humana altera este processo natural, em geral, acelerando sua ação e aumentando sua intensidade. Quando a ação antrópica é caracterizada como deflagradora e/ou intensificadora dos processos de erosão é adotado o termo erosão acelerada.

A erosão hídrica tem a chuva como principal agente erosivo, manifestando sua ação em duas frentes: pela ação da gota e pelo escoamento superficial. Ambos atuam no arrancamento e transporte das partículas.

Embora possa parecer de simples concepção, o fenômeno da erosão hídrica destaca-se sobretudo pela complexidade dos mecanismos envolvidos. A principal causa da dificuldade no estudo dos processos erosivos é, com certeza, a multiplicidade e a inter-relação de fatores intervenientes no fenômeno. Estes fatores podem ser agrupados em quatro classes: fatores climáticos (chuva, temperatura, radiação solar e vento); fatores

topográficos (declividade e o comprimento de rampa); fator vegetação (cobertura vegetal) e fator solo (erodibilidade do solo).

A erodibilidade pode ser definida como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo. Constitui uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade em função dos grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes. Num sentido mais amplo, a propriedade erodibilidade pode também levar em conta as características dos solos determinantes da intensidade da ação dos agentes erosivos, são os aspectos de infiltrabilidade, relacionados a um maior ou menor escoamento superficial.

Na literatura técnica, os estudos sobre erodibilidade vêm de diferentes áreas do conhecimento: Agronomia, Hidráulica de Canais e menos freqüentemente do meio geotécnico (Geologia de Engenharia e Engenharia Geotécnica). Em geotecnia, as pesquisas no estudo da erodibilidade e dos fatores que condicionam a resistência a erosão ainda são muito escassas, se comparadas com a importância dos problemas geotécnicos gerados.

A ação erosiva acelerada da água sobre os solos em ambientes urbanos é quase sempre associada à intervenção imprópria do homem no meio físico, que pode ser resumida em três aspectos condicionantes: o aumento na energia do fluxo das águas pluviais por alterações na topografia original dos terrenos, como no caso da execução de taludes de corte; a concentração do fluxo das águas

superficiais pela abertura de ruas, por estruturas de drenagem mal projetadas e/ou mal executadas e por redes de galerias pluviais e de esgotos lançados de forma inadequada nos talvegues receptores; e pela exposição de solos erodíveis à ação direta do fluxo de águas pluviais.

Para ilustrar a problemática da erosão dos solos e sua importância em engenharia vale referência ao estudo sobre os principais aspectos relacionados a erosão urbana na Região Metropolitana de Porto Alegre, apresentado por Bastos e Davison Dias [3]. Nesta região são constatados graves problemas de erosão hídrica acelerada, principalmente em loteamentos de baixa a média renda e em taludes rodoviários. Em muitos loteamentos, a erosão é considerada o principal problema geotécnico, gerando grandes prejuízos às obras de infraestrutura como pavimentos, sistemas de drenagem e esgotos, redes de água e energia e até mesmo edificações e outras construções existentes. No caso de cortes em perfis de solos residuais, ao longo de muitas das rodovias e estradas vicinais da região, os processos erosivos têm gerado a degradação e a instabilidade destes taludes e o comprometimento da infraestrutura das rodovias e estradas, seja pelo avanço dos processos erosivos ou pelo acúmulo de sedimentos gerados. Estas manifestações constituem, além de sérios problemas de engenharia, fatores de desequilíbrio ambiental, com conseqüências quase sempre de caráter regional. Associados às erosões, os assoreamentos trazem como resultado imediato a redução na seção transversais dos cursos d'água adjacentes às erosões e, em conseqüência, inundações que atingem as populações ribeirinhas.

Problemas como estes têm conscientizado a comunidade geotécnica da necessidade em se identificar o potencial erosivo dos terrenos antes da intervenção, levando em conta as condicionantes envolvidas (declividades, vegetação, drenagem, etc...), em particular, a propriedade erodibilidade dos solos.

A erodibilidade constitui aquele fator mais próximo ao enfoque geotécnico, pois está relacionado diretamente às propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas dos solos. Entretanto, é de consenso no meio geotécnico que ainda são necessários estudos que consolidem métodos de avaliação da erodibilidade e que permitam sua abordagem segundo propriedades geomecânicas de comportamento tratadas pela

Mecânica dos Solos (ISSMFE [13]; Pastore [21] e Vilar e Prandi [28]).

Neste artigo é feita uma revisão dos estudos realizados no meio geotécnico sobre erodibilidade dos solos. A tendência atual e futura de previsão da erodibilidade a partir de propriedades de comportamento geomecânico, em particular para solos residuais, é discutida, com destaque a proposta de abordagem apresentada por Bastos [2].

2. AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DA ERODIBILIDADE – antecedentes

No âmbito da Mecânica dos Solos, ainda têm sido pequenos os esforços no sentido de procurar esclarecer os fatores que condicionam a resistência à erosão. Sua medida esbarra em dificuldades práticas, pois, em geral, envolve esforços de muito pequena magnitude se comparados com a resistência do solo a outras solicitações, além de ser necessário representar, quase sempre, complexas condições ambientais (Vilar e Prandi [28]). A busca de relações entre a erodibilidade dos solos e outras propriedades geotécnicas, o desenvolvimento de técnicas de ensaios e de critérios de avaliação da erodibilidade constituem os principais objetivos dos trabalhos de pesquisa presentes na literatura técnica. A maioria destes estudos são voltados a soluções de problemas da engenharia geotécnica relacionados a erosão hídrica de solos tropicais e subtropicais.

2.1. Pioneiras pesquisas desenvolvidas no LNEC

Dentre os trabalhos sobre erodibilidade em engenharia, vale destacar o pioneirismo dos estudos iniciados na década de 60 pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) e pelo Laboratório de Engenharia de Angola com o objetivo de obter critérios de erodibilidade para solos tropicais encontrados em cortes de estradas. Várias propriedades físicas, químicas e mineralógicas que potencialmente influenciam a resistência dos solos à erosão foram investigadas e correlacionadas a resultados de perda de solo em ensaios de canal hidráulico e observações de campo (Santos e Castro [23] e [24] e Meireles [14]). As principais propriedades relacionadas com a erodibilidade foram a expansibilidade, a distribuição granulométrica e a plasticidade dos solos.

Uma dita abordagem geotécnica do problema de erosão em taludes é apresentada por Nascimento e Castro [18]. Os pesquisadores do LNEC modelam o solo de encosta frente à erosão como um talude infinito sujeito a uma tensão tangencial que corresponde a tensão cisalhante hidráulica. A resistência à erosão é identificada como sendo a resistência ao cisalhamento dada pela lei de Coulomb, generalizada ao escoamento superficial em taludes. Esta abordagem é implementada por Nascimento [16], com a proposta de um novo mecanismo para a erosão de solos não coesivos, onde as forças hidráulicas atuantes apresentam flutuações inerentes com a condição do fluxo junto à superfície do solo. As variações nas tensões normais também determinam flutuações nos valores de resistência friccional. Logo, a ação erosiva do fluxo superficial passa a ser modelada segundo uma função probabilística.

A contribuição da coesão na resistência à erosão é discutida pelos pesquisadores portugueses Nascimento e Castro [18]. Consideram dois tipos de coesão atuantes nos solos: a coesão não pétreia, que desaparece quando o solo é imerso em água, e a coesão pétreia, resistente à imersão. A contribuição destes dois tipos de coesão na resistência à erosão pode ser avaliada pelo chamado grau de petrificação (Nascimento et al. [17]). A abordagem é diferenciada conforme os solos sejam incoerentes ou coerentes com finos expansivos (sem coesão), coerentes sem petrificação (somente coesão não pétreia) ou coerentes com petrificação (com coesão pétreia).

Com base nos estudos de Santos e Castro [23] e [24], Nascimento e Castro [18] propõem um critério escolha de solos resistentes à erosão onde a granulometria, a expansibilidade e o grau de petrificação são as propriedades geotécnicas que o fundamentam.

2.2. Ensaios de erosão

O uso de ensaios específicos para avaliação da erodibilidade, os chamados ensaios de erosão, ainda não é totalmente difundido no meio geotécnico. Com a exceção dos ensaios destinados a avaliar a dispersibilidade de solos (como o “pinhole”, o ensaio de sedimentométrico comparativo e o “crumb test”), a presença de dispositivos para ensaios de erodibilidade por fluxo superficial ainda não é cena comum em laboratórios de Mecânica dos Solos no Brasil.

Entretanto, alguns destes ensaios merecem menção pela potencial aplicação na previsão da erodibilidade de solos tropicais: o ensaio de Inderbitzen e o ensaio de desagregação.

2.2.1. O ensaio de Inderbitzen

Dentre os ensaios em canais hidráulicos, o ensaio de Inderbitzen (ou erosômetro) é aquele mais empregado no meio geotécnico, principalmente pela sua simplicidade. Inderbitzen [12] apresenta a concepção original do canal hidráulico e do método de ensaio. É medida a perda de solo em amostras cuja superfície coincide com um plano de inclinação variável por onde passa um fluxo d'água com vazão controlada. O equipamento procura simular como o solo se comporta frente a um fluxo d'água superficial, permitindo determinar a influência de fatores como a densidade e a umidade do solo, a declividade da rampa, a vazão e a duração do fluxo.

Na pesquisa “Estabilidade de Taludes” (IPR/COPPE/TRAFECON), desenvolvida no período de 1975 a 1978 (Brasil [6]), o ensaio de Inderbitzen foi introduzido no Brasil e proposto como ensaio geotécnico para avaliação da erodibilidade dos solos. O equipamento de Inderbitzen empregado, ilustrado na figura 1, foi construído com base no esboço do equipamento do LNEC, trazido ao Brasil pelo engenheiro Salomão Pinto. Foram realizados ensaios em solos de alteração de gnaiss de taludes da Via Dutra. Detalhes dos métodos de ensaio são descritos por Brasil [6] e Fonseca [10], enquanto os resultados obtidos apresentados por Brasil [6], Ferreira [9] e Fonseca e Ferreira [11].

Após a experiência do IPR, o uso do ensaio de Inderbitzen no Brasil só ressurgiu na década de 90. Fácio [8] e Carvalho e Fácio [7] utilizam-se do equipamento de Inderbitzen construído em Brasília num convênio entre a UnB e a empresa NOVACAP. As inovações mais importantes no equipamento foram: a possibilidade de realizar três ensaios simultâneos a partir de três calhas paralelas; a criação de bacias de uniformização do fluxo e a fixação roscável das amostras. Foram ensaiados solos oriundos de erosões situadas em cidades satélites no Distrito Federal. Santos [22] ensaiou solos de erosões de Goiânia no equipamento da UnB, com a restrição do fluxo na rampa somente na largura determinada pela seção da amostra. O autor destaca a necessidade da

normatização do ensaio, da criação de critérios classificatórios a partir de resultados obtidos e da realização de testes de previsibilidade, ensaiando-se solos semelhantes em erosões e em terrenos adjacentes não erodidos.

Bastos [2] realizou ensaios de Inderbitzen para amostras indeformadas obtidas de perfis de solos residuais encontrados na Região Metropolitana de Porto Alegre, verificando uma satisfatória correspondência entre o comportamento em campo e os resultados em laboratório.

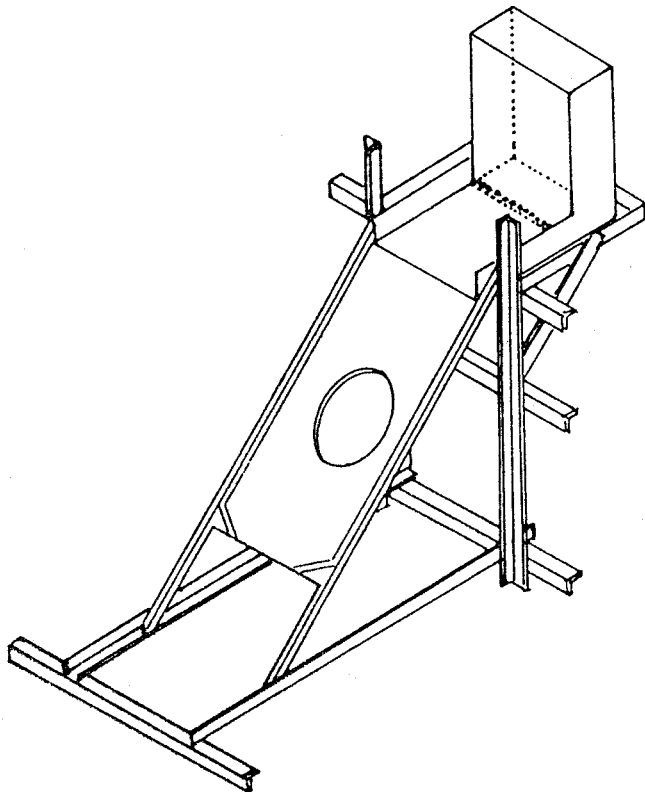


Figura 1 – Equipamento para ensaio de Inderbitzen desenvolvido no IPR (Fonte: Fonseca e Ferreira [11])

2.2.2. O ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação (“slaking test”) evoluiu do chamado “crumb test”, ensaio preconizado para identificação de solos dispersivos através da imersão de agregados de solo em água. Entretanto, o objetivo maior deste ensaio é a verificação da estabilidade à desagregação de uma amostra de solo cúbica ou cilíndrica, independente da dispersão do material. A aplicação do ensaio de desagregação para fins geotécnicos foi idealizado pela engenheira Anna Margarida Fonseca, ao estudar propriedades dos solos para fins de fundações durante a construção de Brasília (Ferreira [9]). Como desagregação (ou “slaking”) entende-se o processo de ruína de uma amostra de

solo não confinada, exposta ao ar e na seqüência imersa em água (Moriwaki e Mitchell [15]).

Na pesquisa IPR/COPPE/TRAFECON (1975–1978), o ensaio de desagregação foi indicado como critério qualitativo na investigação da erodibilidade de solos em taludes de estradas. O ensaio proposto consistia em colocar amostras indeformadas em um recipiente com água de tal forma que fique parcialmente submerso. São registrados o tempo de aparente saturação das amostras, o tempo de início de sua fissuração e o tempo para desagregação total ou parcial. Fonseca [10] propõe o uso da velocidade de desagregação como um índice classificatório para a erodibilidade de solos superficiais de taludes.

Santos [22] apresenta resultados de ensaios de desagregação para solos de erosões de Goiânia. Na interpretação dos resultados, o autor identifica como principal mecanismo observado o abatimento provocado pelo processo de saturação das amostras, que anula a sucção matricial e gera poropressão positiva capaz de desestruturar e desagregar o solo. É proposto o emprego do ensaio para previsão inicial do comportamento dos solos frente a um esforço erosivo, auxiliando no direcionamento de outros ensaios de erosão.

Pela sua simplicidade e pelos bons resultados obtidos para solos residuais da Grande Porto Alegre, Bastos [2] indica o ensaio de desagregação como critério preliminar na avaliação da erodibilidade.

2.3. As pesquisas sobre erodibilidade a partir da Metodologia MCT

Um novo direcionamento na pesquisa sobre a erodibilidade dos solos tropicais e subtropicais foi devido aos estudos realizados com base na Metodologia MCT. Segundo Nogami e Villibor [19], a classificação MCT cobre lacunas deixadas pelas classificações geotécnicas tradicionais e pela isolada associação de Pedologia e Geologia na previsão do comportamento dos solos tropicais frente à erosão. Outras especificações do comportamento dos solos frente à erosão, baseadas na classificação MCT, são apresentadas por Villibor et al. [29] e Pastore [21].

A grande preocupação gerada em virtude dos fenômenos erosivos em taludes de corte e o insucesso na aplicação, entre outros, dos critérios do LNEC para cortes em solos do Estado de São Paulo, levaram o professor Job Nogami a

desenvolver uma nova metodologia para avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos tropicais. Segundo Nogami, um método adequado à previsão da erodibilidade deve levar em conta a taxa de infiltração d'água através da superfície do talude, o efeito da secagem sobre o comportamento dos solos sob inundação e a necessidade do uso de amostras indeformadas nos ensaios. O critério de erodibilidade, apresentado por Nogami e Villibor [19], é essencialmente empírico e baseado na correlação com o comportamento frente à erosão de um grande número de cortes. Segundo os autores, as duas propriedades que permitem prever o comportamento dos solos tropicais frente à erosão hídrica são a infiltrabilidade e a erodibilidade específica. A infiltrabilidade, propriedade hidráulica de solos não saturados, representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície e é quantificada pelo coeficiente de sorção. A erodibilidade específica é representada pela perda de massa por imersão. Ensaios específicos para quantificar estas propriedades foram incorporados à Metodologia MCT (figura 2). A partir dos dados de coeficiente de sorção (s em $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$) e perda de massa por imersão modificado (π em %), Nogami e Villibor [19] estabelecem a relação $\pi/s = 52$ como limite ao critério de erodibilidade (figura 3). Solos com $\pi/s > 52$ são considerados erodíveis, alertando para adequadas medidas de proteção à erosão em taludes de corte.

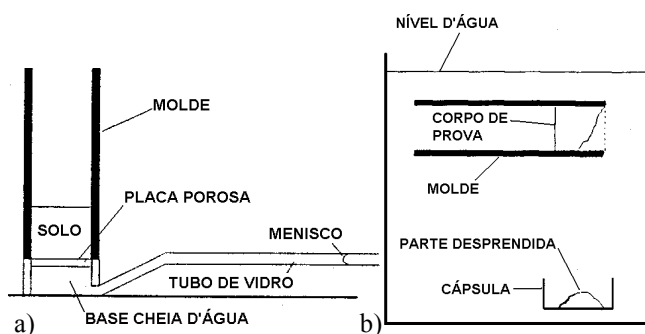


Figura 2 – Ensaios da Metodologia MCT para avaliação da erodibilidade: a) ensaio de infiltrabilidade e b) ensaio de erodibilidade específica (Fonte: Nogami e Villibor [20])

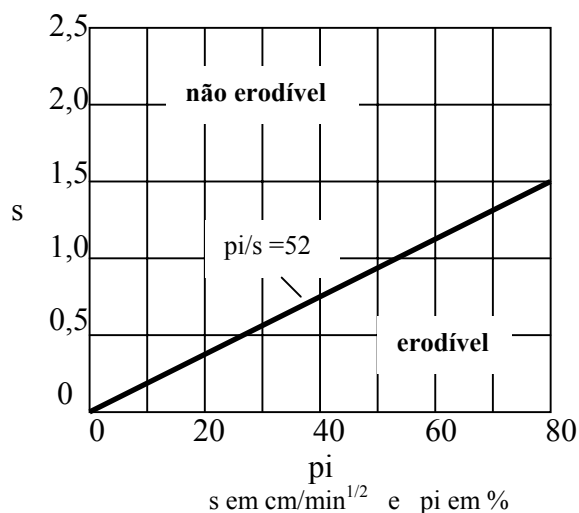


Figura 3 – Critério de erodibilidade pela Metodologia MCT

O critério de erodibilidade MCT foi confirmado por Bastos [2] para solos residuais da Região Metropolitana de Porto Alegre, sendo indicado pelo autor dentro de uma proposta de abordagem geotécnica à erodibilidade de solos residuais não saturados.

O emprego da classificação MCT modificada¹ (MCT-M) na caracterização da erodibilidade foi apresentado por Vertamatti e Araújo [25]. Com base no comportamento frente à erosão de taludes rodoviários do interior de São Paulo e em aeroportos de Santarém/PA e Manaus/AM, foram definidos graus de erosão (Grau de Erosão Associado – GEA, segundo Vertamatti e Araújo [27]), relacionados a classificação geotécnica dos solos por faixas de erodibilidade superpostas ao gráfico classificatório MCT-M. De uma maneira geral, os solos lateríticos correspondem ao grau zero de mínima erosão, os chamados solos transicionais aos graus 1 e 2 e os solos saprolíticos ao grau 3 de máxima erosão.

Vertamatti e Araújo [25] propõe um outro critério para previsão do potencial erosivo de solos tropicais, baseado no chamado fator genético e na propriedade de retenção d'água dos solos (sucção). O fator genético é considerado através da Metodologia MCT-M e a retenção d'água foi caracterizada pelo levantamento de curvas de sucção desde pastilhas cortadas de corpos de prova compactados. Segundo os autores, apesar do uso

¹ A classificação MCT-M constitui modificação à classificação MCT tradicional, proposta por Vertamatti (1988) apud Vertamatti e Araújo [25], ao incluir as classes de solos transicionais.

de amostras compactadas, o critério leva em conta a interpretação da fenomenologia dos processos erosivos com base em novas variáveis, em especial na sucção, antes não contemplada nos estudos geotécnicos sobre erosão. O critério foi aperfeiçoado por Vertamatti e Araújo [26] e [27], que apresentam um ábaco de erodibilidade para solos tropicais, estabelecido com base no tratamento estatístico de cerca de quarenta solos ensaiados pela Metodologia MCT-M e com suas respectivas curvas de sucção levantadas.

2.4. Pesquisas relacionando a erodibilidade com propriedades de comportamento geomecânico dos solos

Numa busca de outros indicadores da erodibilidade de solos tropicais, Alcântara [1] comparou o comportamento in situ de solos de São Carlos/SP e Salvador/BA com resultados de ensaios de estabilidade de agregados por peneiramento em água, de ensaios de compressão simples e de um ensaio de penetração de cone de laboratório proposto para este fim.

O ensaio de penetração de cone foi adaptado a partir do dispositivo para ensaio de determinação do limite de liquidez de argilas remoldadas (figura 4). O ensaio consiste na medida da penetração alcançada em nove pontos da superfície de uma amostra indeformada moldada em anel metálico. A partir da diferença nos valores de penetração médios nas condições de umidade natural e saturada das amostras foram definidos os parâmetros de variação de penetração relacionados à erodibilidade dos solos. Os ensaios de resistência à compressão simples em amostras na umidade natural e saturadas mostraram que solos de alta susceptibilidade à erosão hídrica apresentam as maiores perdas de resistência com a saturação. A estabilidade de agregados, medida da resistência dos agregados à água, retrata o grau de agregação de um dado solo e tem influência nas características hidráulicas e físicas deste solo de tal sorte a inferir na sua erodibilidade. O autor propôs o ensaio de peneiramento em água para avaliação da resistência dos agregados e utilizou o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) das partículas para análise. Os parâmetros obtidos nestes três ensaios permitiram separar solos com comportamento diferenciado frente à erosão.

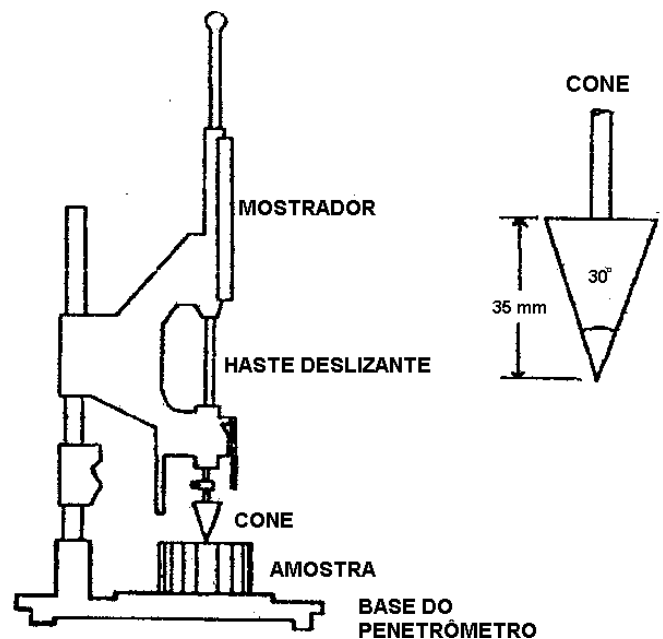


Figura 4 – Dispositivo para o ensaio de cone de laboratório (Fonte: Alcântara [1])

Baseado nos principais estudos sobre a erodibilidade de solos tropicais e subtropicais sob o enfoque geotécnico, Bastos [2], na pesquisa envolvendo perfis de solos residuais da Grande Porto Alegre, buscou relações entre a erodibilidade e outras propriedades de comportamento estudadas pela Mecânica dos Solos e sobretudo lançou uma proposta de abordagem geotécnica para a previsão da susceptibilidade dos solos residuais a erosão hídrica por fluxo superficial. Em resumo, a abordagem proposta é dividida em três etapas básicas:

- Levantamento de dados preliminares sobre o problema: características geométricas, caracterização geológica e pedológica, posição do perfil de solo na geomorfologia local e descrição dos perfis;
- Investigação in situ do comportamento dos solos frente a erosão com a definição de classes de erodibilidade relativa dos materiais;
- Avaliação da erodibilidade em laboratório segundo duas alternativas: avaliação direta por ensaios de Inderbitzen (quando disponível o equipamento) ou avaliação indireta por propriedades relacionadas ao comportamento dos solos frente à erosão.

Segundo o autor a avaliação indireta permite identificar solos potencialmente erodíveis, isto é, que em condições normais são susceptíveis a processos de erosão hídrica acelerada. Esta avaliação é possível a partir de um critério

preliminar pelo emprego do ensaio de desagregação (solos que desagregam em água são considerados potencialmente erodíveis). A partir daí, a avaliação indireta é definida desde três níveis de informação (crescentes em importância):

- 1º nível: caracterização geotécnica (dados de granulometria, plasticidade, parâmetro K_{USLE} e Razão de Dispersão de Middleton);
- 2º nível: classificação e ensaios pela Metodologia MCT (ensaio de infiltrabilidade e erodibilidade específica para aplicação do critério de erodibilidade MCT);
- 3º nível: ensaios de resistência ao cisalhamento (preferencialmente ensaios de cisalhamento direto) para quantificação da variação de coesão do solo com a inundação.

Quanto mais se avança os níveis de informação, aumenta a confiabilidade na previsão da erodibilidade desde a avaliação indireta.

Os detalhes e a quantificação dos critérios empregados nesta proposta de abordagem fogem ao escopo deste trabalho e encontram-se publicados originalmente por Bastos [2].

3. AS TENDÊNCIAS NO ESTUDO DA ERODIBILIDADE EM GEOTECNIA

A erodibilidade dos solos ainda constitui um tema estudado por um número limitado de pesquisadores geotécnicos. Poucos núcleos de geotecnia mantêm pesquisas na área, dentre os quais cabe destacar a Universidade de Brasília, a Escola de Engenharia de São Carlos, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Universidade Federal de Minas Gerais. Apesar disso, o tema erosão conquistou seção específica no temário do último grande evento nacional em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (XI COBRAMSEG, Brasília/1998).

Os últimos estudos realizados e atualmente em curso têm se voltado a busca de um melhor entendimento da fenomenologia envolvida no processo erosivo, a incrementação dos ensaios de erosão e a busca de relações entre a erodibilidade e outras propriedades de comportamento dos solos.

A interação com outras áreas do conhecimento que estudam o mesmo tema, mesmo que com um outro enfoque, tem sido também um caminho próspero. Os estudos agrônômicos são pródigos na modelagem dos mecanismos atuantes na erosão por fluxo superficial, enquanto que a experiência de pesquisadores da área da Hidráulica de Canais

em modelos experimentais e ensaios em canais hidráulicos é muito relevante.

Entretanto, são as pesquisas que buscam relacionar a erodibilidade com outras propriedades geomecânicas dos solos que tem merecido maior destaque.

Bastos [2], por referência, estudou relações entre a erodibilidade e a colapsibilidade e a variação de resistência ao cisalhamento com o umedecimento dos solos. Quanto a colapsibilidade, conclui que esta propriedade não mostrou relação satisfatória com a erodibilidade medida em ensaios de Inderbitzen. A diferença nos esforços envolvidos na análise de cada destas propriedades, compressão e cisalhamento hidráulico, respectivamente, é a explicação encontrada. Já quanto a resistência ao cisalhamento na superfície dos terrenos, representada pela coesão, o estudo mostrou que os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam maior perda de coesão com o umedecimento e inundação, logo mais vulnerável ao destacamento de partículas por cisalhamento hidráulico (Bastos et al. [4]).

Outros estudos neste sentido têm indicado esta próxima relação entre erodibilidade e coesão. Uma tendência natural dos estudos em geotecnia será o desenvolvimento de uma modelagem matemática e numérica ao fenômeno da erosão por fluxo superficial. Como elementos principais do modelo ter-se-ia:

- A estimativa das tensões hidráulicas atuantes pelo fluxo superficial a partir de condicionantes hidrológicas e da infiltrabilidade do solo;
- A resistência à erosão prevista pela coesão dos solos superficiais e sua variação com a saturação do terreno;
- A estimativa da perda de solo resultante com base nos dados de taxa de erodibilidade, obtidos em ensaios de erosão como o ensaio de Inderbitzen.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A erodibilidade, considerada como uma propriedade geotécnica dos solos, exige pesquisas no sentido de definição de técnicas e critérios na sua quantificação.

Estudos realizados destacam o potencial da Metodologia MCT e do ensaio de desagregação na avaliação indireta da erodibilidade. Ambas técnicas fundamentam-se na relação entre a

susceptibilidade a erosão e a desagregação do solo quando imerso em água.

Quanto a avaliação direta da erodibilidade em laboratório, os ensaios em canais hidráulicos com amostras indeformadas constitui a principal ferramenta. Dentre estes, o ensaio de Inderbitzen, pela sua simplicidade em equipamento e operação, é aquele mais indicado. Entretanto, em relação aos equipamentos disponíveis, melhorias no controle e medição das tensões hidráulicas aplicadas e na quantificação do material erodido devem ser implantadas (Bastos et al. [5]).

A comprovação experimental da relação entre a resistência a erosão por fluxo superficial e a coesão, entendida como a resistência ao cisalhamento sob mínima tensão de confinamento, é um importante aspecto que favorece o entendimento, pelo engenheiro geotécnico, dos mecanismos envolvidos no processo de erosão hídrica superficial.

Como já mencionado, a magnitude dos problemas em erosão urbana no país exige dos engenheiros uma abordagem específica e fundamentada em conhecimento teórico experimental compatível. Tem-se portanto aí um desafiador e promissor campo de pesquisa para a geotecnia nacional.

REFERÊNCIAS

1. Alcântara, M.A.T. *Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos*. São Carlos/SP, 1997, 128p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos.
2. Bastos, C.A.B. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Porto Alegre/RS, 1999, 298p. Tese de Doutorado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
3. Bastos, C.A.B.; Dias, R.D. *Aspectos sobre a erosão urbana na região metropolitana de Porto Alegre*. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 5., 1995, Baurú/SP. Anais..., Baurú/SP: ABGE/P.M.Baurú/UNESP, 1995. p.149–152.
4. Bastos, C.A.B.; Gehling, W.Y.Y.; Bica, A.V.D. *Some considerations about the shear strength and erodibility of unsaturated residual soils*. In: International Conference on Unsaturated Soils, 2., 1998, Beijing. Proceedings..., Beijing: ISSMGE/CISMGE-CCES, 1998a. v.1, p.19–24.
5. 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).
6. Brasil. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Divisão de Pesquisas. *Recomendações para proteção de taludes contra erosão*. Rio de Janeiro/RJ: IPR/DNER, 1979. 59p.
7. Carvalho, J.C.; Fácio, J.A. *Estudo da erodibilidade de solos do Distrito Federal*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10., 1994, Foz do Iguaçu/PR. Anais... Foz do Iguaçu/PR: ABMS, 1994. v.4, p.1245–1252.
8. Fácio, J.A. *Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal*. Brasília/DF, 1991, 107p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
9. Ferreira, C.S.M. *Erosão – Investigações de campo e laboratório desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias*. In: Simpósio Nacional sobre o Controle de Erosão, 2., 1981, São Paulo/SP. Anais... São Paulo/SP: ABGE, 1981. v.1, p.203–216.
10. Fonseca, A.M.M.C.C. *Técnicas para previsão, prevenção e contenção da erosão em taludes e encostas*. In: Simpósio Nacional sobre o Controle de Erosão, 2., 1981, São Paulo/SP. Anais... São Paulo/SP: ABGE, 1981. v.1, p.217–234.
11. Fonseca, A.M.M.C.C.; Ferreira, C.S.M. *Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos*. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais, 1., 1981, Rio de Janeiro/RJ. Anais..., Rio de Janeiro/RJ: COPPE/ABMS, 1981. p.646–667.
12. Inderbitzen, A.L. *An erosion test for soils*. Materials Research & Standards, Philadelphia, v.1, n.7, p.553–554, 1961.
13. International Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering. *Progress Report (1982–1985) of the comitee on tropical soils:*

- Peculiaridades of geotechnical behaviour of tropical lateritic and saprolitic soils.* In: International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 1., 1985, Brasília/DF. Proceedings..., Brasília/DF: ABMS, 1985. p.1–45.
14. Meireles, J.M.F. *Erosão de taludes de estradas.* In: Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil, 2., 1967, Rio de Janeiro/RJ – São Paulo/SP. Anais... Rio de Janeiro/RJ – São Paulo/SP, 1967. p.204–211.
 15. Moriwaki, Y.; Mitchell, J.K. *The role of dispersion in the slaking of intact clay.* ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.623, p.172–190, 1977. (Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects, Eds: Sherard, J.L. and Decker, R.S.).
 16. Nascimento, U. *The mechanism of erosion in noncohesive soils.* Memória LNEC, Lisboa, n.561, 15p., 1981.
 17. Nascimento, U.; Branco, F.; Castro, E. *Identification of petrification in soils.* In: International Conference on Soil Mechanics and Engineering Foundation, 6., 1965, Montreal. Anais..., Montreal: ISSMFE, 1965. v.1, p.80–81.
 18. Nascimento, U.; Castro, E. *Defesa de taludes contra a erosão. Critérios de selecção de solos.* Geotecnia, Lisboa, n.20, p.17–33, 1976.
 19. Nogami, J.S.; Villibor, D.F. *Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area.* Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Krefeld, n.19, p.196–199, 1979.
 20. Nogami, J.S.; Villibor, D.F. *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.* São Paulo/SP: Editora Villibor, 1995. Cap.7: Erosão na faixa marginal, p.169–196.
 21. Pastore, E.L. *Contribuição ao tema geotecnia e meio ambiente: erosão.* In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 8., 1986, Porto Alegre/RS. Anais... Porto Alegre/RS: ABMS, 1986. p.43–54.
 22. Santos, R.M.M. *Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia.* Brasília/DF, 1997, 120p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
 23. Santos, M.P.; Castro, E. *Soil erosion in roads.* In: International Conference on Soil Mechanics and Engineering Foundation, 6., 1965, Montreal. Anais..., Montreal: ISSMFE, 1965. v.1, p.116–120.
 24. Santos, M.P.; Castro, E. *Estudo sobre erosão em taludes de estradas.* In: Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil, 2., 1967, Rio de Janeiro/RJ – São Paulo/SP. Anais... Rio de Janeiro/RJ – São Paulo/SP, 1967. p.220–241.
 25. Vertamatti, E.; Araújo, F.A.R. *Critério para previsão do potencial erosivo de solos tropicais.* In: Reunião Anual de Pavimentação, 24., 1990, Belém/PA. Anais... Rio de Janeiro/RJ: ABPv, 1990. v.1, p.328–348.
 26. Vertamatti, E.; Araújo, F.A.R. *Uma nova abordagem para a previsão do grau de erodibilidade de solos tropicais.* In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 5., 1995, Baurú/SP. Anais..., Baurú/SP: ABGE / P.M.Baurú / UNESP, 1995. p.483–486.
 27. Vertamatti, E.; Araújo, F.A.R. *Elaboração de ábaco de erodibilidade de solos tropicais.* In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11., 1998, Brasília/DF. Anais... Brasília/DF: ABMS, 1998. v.1, p.573–579.
 28. Vilar, O.M.; Prandi, E.C. *Erosão dos solos.* In: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Solos do interior de São Paulo. São Carlos/SP: ABMS / EESC-USP, 1993. Cap.7, p.177–206.
 29. Villibor, D.F.; Nogami, J.; Fabbri, G.T.P. *Proteção à erosão em pavimentos de baixo custo.* In: Reunião Anual de Pavimentação, 21., 1986, Salvador/BA. Anais... Rio de Janeiro/RJ: ABPv, 1986. v.2, p.413–430.