

## CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E DA PERDA DE SOLO SOB CHUVA SIMULADA PARA A FORMAÇÃO BARREIRAS – SALVADOR-BA

Daniel de Souza Machado\*

Júlia Cavalcanti Fadul\*\*

**RESUMO:** *Este artigo apresenta resultados obtidos com o desenvolvimento do projeto de pesquisa: Estudo de Processos Erosivos da Área Urbana de Salvador que se encontra em andamento há mais de um ano no laboratório de solos-UCSal, com bolsa da Fapesb. Aqui, são apresentados resultados de ensaios geotécnicos, de desagregação e perda de solo sob chuva simulada de dois horizontes do perfil de solo residual da formação Barreiras da região metropolitana de Salvador-Ba. Objetiva-se com esse trabalho discutir o uso desses ensaios na avaliação dos mecanismos atuantes no processo erosivo.*

**Palavras-chave:** Formação Barreiras; Erosão; Ensaios geotécnicos.

### 1 - INTRODUÇÃO

A erosão é o processo de desprendimento e transporte das partículas de solo. Este processo é causado pela ação da gravidade combinada com a água, o vento, o gelo, etc. O homem, através de suas diversas atividades, geralmente, causa desequilíbrio de um sistema natural podendo intensificar os processos erosivos, (FERNANDES, 2003).

Em países de clima tropical como o Brasil, a erosão provocada pela ação das chuvas é a mais significativa e a que traz maiores problemas de deslizamento de encostas. O crescimento desordenado, a falta de planejamento e a ausência de saneamento básico agravam os problemas de erosão nas encostas da cidade.

A quantificação da erodibilidade dos solos é uma tarefa bastante complexa, pois envolve fatores externos que condicionam a intensidade da ação erosiva (erosividade da chuva, geometria da encosta, cobertura vegetal, entre outros) e fatores intrínsecos do solo que condicionam sua erodibilidade (textura, mineralogia, estrutura, sucção) (BASTOS et al, 1998). Em função da complexidade dos mecanismos envolvidos, muitos pesquisadores procuram estabelecer correlações da quantificação de erosão com as características geotécnicas do solo.

Desta forma, a identificação e classificação geotécnica dos solos existentes nas áreas denominadas de área de risco ou susceptível à erosão é de grande importância, pois, ao conhecer as características do solo, fica mais fácil o entendimento da origem dos problemas e sugestão de soluções.

No presente trabalho são apresentados resultados de um estudo experimental de avaliação geotécnica da erodibilidade de dois horizontes de solo residual da formação Barreiras ocorrentes na área urbana de Salvador-Ba.

Este trabalho é parte de um projeto para a determinação da erodibilidade do solo (Fator K) e comparação do poder erosivo da formação Barreiras e do Complexo Cristalino já que essas são as formações de maior ocorrência na cidade.

---

\* Estudante, Departamento III / Escola de Engenharia / UCSal; Auxílio fapesb; [danielslash@yahoo.com.br](mailto:danielslash@yahoo.com.br) (autor). Orientadora: Miriam de Fátima Carvalho, Professora Doutora da Escola de Engenharia, [miriam@ucsal.br](mailto:miriam@ucsal.br). Co-orientadores: Jorge Luis Zegarra Tarqui e Kleber Azevedo Dourado, professores da Escola de Engenharia.

\*\* Estudante, Departamento III / Escola de Engenharia / UCSal; Auxílio fapesb; [jcfadul@yahoo.com](mailto:jcfadul@yahoo.com) (co-autor).

## 2 - DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Segundo o Plano Diretor de Encostas, a formação Barreiras, devido a sua constituição arenosa, é mais susceptível aos processos erosivos que as outras formações geológicas que ocorrem na cidade de Salvador. Em função disso, esta formação geológica foi a escolhida para o início dos estudos.

Com as informações contidas no Plano Diretor de Encostas (PDE), levantaram-se áreas, que associavam problemas de instabilização de encostas a processos erosivos, para serem visitadas. A área do Horto Florestal – Mata dos Oitis, coordenadas UTM L24 561 388 m e 8 570 710 m, foi a escolhida para coleta dos blocos indeformados por esta apresentar fácil acesso, ausência de moradias e pertencer à formação Barreiras.

### 2.1 - Perfil estudado

O perfil geotécnico do talude escolhido é formado por duas camadas distintas. Após análise táctil-visual, ficou evidenciado que a primeira camada é formada por Alteração do Barreiras, com características de areia argilosa amarela e espessura máxima de 2,0 m. A parte inferior do talude é composta pelo Barreiras propriamente dito, sendo este uma areia siltosa rosa. As duas camadas são separadas por um cascalho laterítico, e o horizonte inferior é mais espesso que o superior “Figura 1”. Em cada horizonte do perfil, foram coletados 4 blocos indeformados de 35cm x 35cm. Esses blocos foram envoltos por um tecido e parafina para impedir a modificação de sua umidade natural e foram enviados para o laboratório da UCSal para a realização dos ensaios geotécnicos e de erodibilidade.

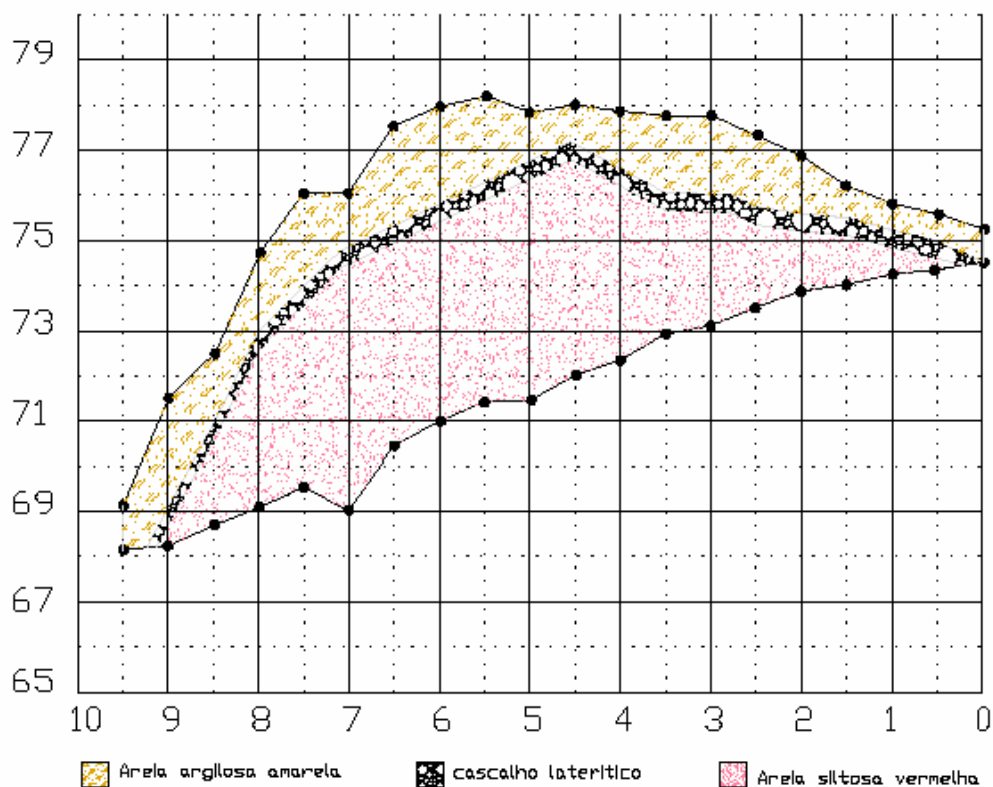


Figura 1 – Perfil geotécnico do solo coletado para os estudos de erodibilidade da Formação Barreiras.

### 3 - ENSAIOS EXECUTADOS

#### 3.1 - Ensaios de Erodibilidade

Para estudo da erodibilidade, foram realizados, inicialmente, ensaios com 3 declividades e precipitações média de 70 mm/h e 119 mm/h impostas por um simulador de chuvas de disco giratório modelo FEL-3 fabricado pela Armfield e composto por uma câmara pulverizadora suportada por uma estrutura metálica e por um módulo de serviço.

Cabe ressaltar que a determinação das intensidades usadas nos ensaios foram obtidas a partir da equação de chuva para a cidade de Salvador encontrada no Plano Diretor de Encostas, com  $Tr = 5$  e  $15$  anos e  $Tc = 30$ min. No que se refere à declividade, foram utilizados os valores de 10, 50 e 80% valores mínimo, médio e máximo, respectivamente, também encontrados no inventário de PDE da cidade do Salvador.

A preparação da amostra começou com a abertura de um bloco e o nivelamento da superfície de moldagem como pode ser visto na “Figura 2a”. Para facilitar a moldagem de amostras indeformadas, construíram-se 4 moldes de aço inoxidável. Estes moldes têm um dos lados rebaixados de 0,5 cm para facilitar a saída dos sedimentos pelo funil vertedor. Das aparas da moldagem, coletou-se material para determinação da umidade natural do bloco em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$ . Após a moldagem, o CP foi levado para o tanque de saturação, “Figura 2b”.

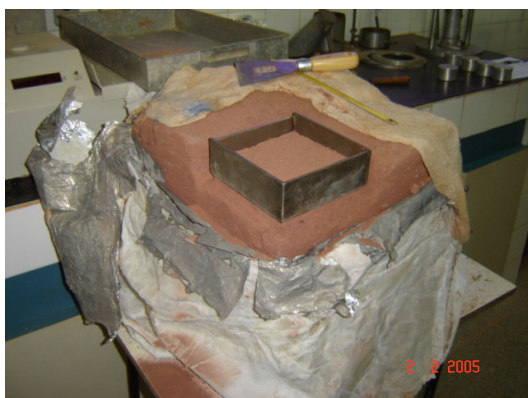


Figura 2a – Moldagem da amostra indeformada



Figura 2b – Saturação da amostra.

Após 1 (uma) hora, o conjunto foi retirado do tanque e levado para o simulador de chuva junto com a rampa de madeira para simular a inclinação do terreno e os copos coletores de chuva por um período de 20 min. Ao final do ensaio, o conjunto (caixa de ensaio e amostra) e o material coletado da lavagem foram levados à estufa ( $105^{\circ}\text{C}$ ). Com o peso da amostra em estado natural e sua umidade natural, definiu-se o peso seco antes do ensaio ( $P_{so}$ ) e após a estabilização do peso da amostra em estufa, tem-se o peso seco após o ensaio ( $P_{sf}$ ). Por diferença, determinou-se a perda total de solo. Os sedimentos coletados no recipiente localizado fora da área de ensaio constituem a perda por lavagem. A perda por “splash” é obtida pela diferença entre a perda total e a perda por lavagem.

## 3.2 - Ensaios Geotécnicos

Para caracterização do solo em estudo, foi realizado uma série de ensaios básicos: ensaios de limite de liquidez (NBR 6459/84), limite de plasticidade (NBR 7180/84), análise granulométrica (NBR 7181/84) e massa específica natural (NBR 10838/88).

### 3.2.2 - Análise granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado com base em dois procedimentos: a) peneiramento - partículas com diâmetros equivalentes superiores a 0,074mm (peneira 200) e b) Sedimentação - partículas com diâmetros equivalentes inferiores a 0,2mm. A preparação das amostras de solo se deu pelos processos de secagem ao ar, quarteamento, destorroamento de 1500g de material. Após a preparação da amostra, segue para o peneiramento, o qual consistiu na passagem do solo por peneiras padronizadas e pesagem das quantidades retidas em cada uma delas. O ensaio de sedimentação foi realizado com 70g de material que passou na peneira nº 10.

A Sedimentação é destinada à caracterização da fração mais fina do solo (granulometria inferior a 0,074mm). Este ensaio se baseia na Lei de Stokes, segundo a qual a velocidade de queda,  $V$ , de uma partícula esférica, em um meio viscoso infinito, é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula. O ensaio de sedimentação é realizado medindo-se a densidade de uma suspensão de solo em água, no decorrer do tempo. Inicialmente os 70g de solo foram colocados em imersão com 125cm<sup>3</sup> de solução defloculante (formada por 45,7gramas de hexametáfosfato, cerca de 3g de carbonato de sódio e 1 litro de água destilada). Essa solução é usada para evitar a aglutinação das partículas durante o ensaio, o que levaria à contabilização do mesmo como uma partícula maior. A mistura foi submetida ao aparelho dispersor durante 15 minutos. A dispersão é transferida para a proveta e agitada para manter as partículas em suspensão. Após a agitação, coloca-se a proveta sobre uma mesa e efetuam-se as leituras no densímetro nos tempos de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15, dobrando o tempo para as leituras subseqüentes até completar as 24 horas. Antes de cada leitura no densímetro, deve ser feita a medida da temperatura da dispersão. A partir da medida da densidade da solução no tempo, calcula-se a percentagem de partículas que ainda não sedimentaram e a velocidade de queda destas partículas. Com o uso da lei de Stokes, pode-se inferir o diâmetro máximo das partículas ainda em suspensão, de modo que, com estes dados, a curva granulométrica seja completada.

Este ensaio foi realizado com e sem a utilização do defloculante. O defloculante é utilizado para desagregar as pequenas aglomerações de solo, possibilitando uma análise minuciosa da granulometria do mesmo. No entanto, quando da ocorrência do processo erosivo na natureza, este encontra os grãos agregados, por isso uma análise granulométrica sem defloculante representa melhor o que ocorre no campo.

### 3.2.3 - Limite de Liquidez

A determinação do limite de liquidez do solo foi realizada de acordo com o seguinte procedimento: 1) colocou-se na concha do aparelho de Casagrande “Figura 3a” uma pasta de solo passando #40 e com umidade próxima de seu limite de plasticidade. 2) fez-se um sulco na pasta com um cinzel padronizado. 3) aplicaram-se golpes à massa de solo posta na concha do aparelho de Casagrande, girando-se uma manivela, a uma velocidade padrão de 2 golpes por segundo. Esta manivela fez com que a concha do aparelho de Casagrande caísse de uma altura padrão de aproximadamente 1cm. 4) e contou-se o número de golpes necessário para que a ranhura de solo se fechasse em uma extensão em torno de 1cm. 5) Retirou-se uma porção de 1x1cm que foi levado à estufa para determinação da umidade. 6) repetiu-se este processo ao

menos 5 vezes, geralmente empregando-se valores de umidade crescentes. 7) lançaram-se os pontos experimentais obtidos, em termos de umidade *versus* log N° de golpes. 8) ajustou-se uma reta, passando por esses pontos. O limite de liquidez corresponde à umidade para a qual foram necessários 25 golpes para fechar a ranhura de solo.

### 3.2.4 - Limite de Plasticidade

A determinação do limite de plasticidade “Figura 3b” do solo foi realizada preparando-se uma pasta com o solo que passa na peneira #40, fazendo-a rolar com a palma da mão sobre uma placa de vidro esmerilhado, formando um pequeno cilindro. Quando o cilindro de solo atingiu o diâmetro de 3mm e apresentou fissuras, levou-se este material à estufa para determinação da umidade do solo. Esta operação foi repetida pelo menos 5 vezes, definido assim como limite de plasticidade o valor médio dos teores de umidade determinados.

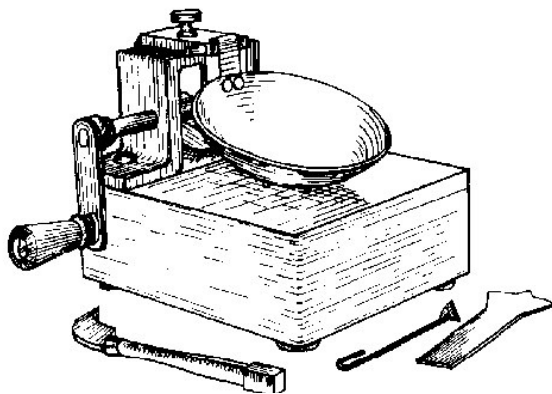


Figura 3a – Aparelho de Casagrande plasticidade

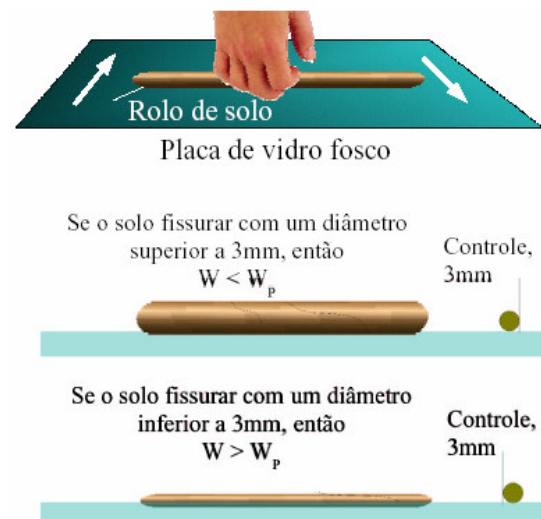


Figura 3b – Determinação do limite de plasticidade

### 3.2.5 - Ensaio de Desagregação

Para os ensaios de desagregação, foram moldados seis amostras indeformadas prismáticas com arestas iguais a seis centímetros (3 de cada horizonte) do solo em estudo. As amostras foram levados a um recipiente com lâmina d’água até 1/3 da altura de cada bloco e foram observados as suas reações ao processo de saturação. Esse ensaio foi executado segundo REGO (1978).

Segundo Holmgren & Flanagan (1977) apud SANTOS e CARVALHO (1998), a partir de ensaios de desagregação em amostras remoldadas, podeu-se classificar os tipos de reação à inundação em:

- sem resposta: quando a amostra mantém sua forma e tamanho originais;
- abatimento: quando a amostra se desintegra formando uma pilha de material desestruturado;
- fraturamento: quando a amostra se quebra em fragmentos mantendo a forma original das faces externas;
- dispersão: as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma “nuvem” coloidal que cresce à medida que a amostra se dissolve.

## 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 - Ensaio de Erodibilidade

Dos ensaios executados, foi possível construir uma tabela com os valores médios de perda por lavagem, splash e total, Tabela 1. Da análise dos resultados, observa-se que os valores de perda por splash são maiores que os de perda por lavagem, independente da declividade. Isso demonstra que a desagregação do solo indeformado se dá pelo impacto da gota e não pela tensão cisalhante originada pela lâmina d'água do escoamento superficial.

Tabela 1 – Valores médios das perdas.

Tipo de solo	Intensidade da chuva (mm/h)	Declividade (%)	Valores de perda (g/m <sup>2</sup> )		
			Lavagem	Splash	Total
Alteração do Barreiras	70	0,10	307,24	1.704,01	2.011,25
		0,50	301,27	1.325,19	1.626,46
		0,80	341,23	1.333,84	1.675,07
	119	0,10	591,47	1.635,01	2.226,48
		0,50	673,98	1.633,86	2.307,84
		0,80	641,37	2.181,30	2.822,67
Barreiras	70	0,10	626,28	1.750,59	2.376,87
		0,50	632,93	1.634,84	2.267,77
		0,80	510,48	1.724,41	2.234,89
	119	0,10	1.161,95	2.578,38	3.740,33
		0,50	1.356,63	2.419,86	3.776,49
		0,80	1.658,13	2.042,71	3.700,84

Para os dois horizontes do solo proveniente da formação Barreiras, observou-se que a intensidade da chuva tem papel mais significativo no processo erosivo do que a declividade do terreno. No entanto é possível perceber que o Barreiras propriamente dito é mais susceptível à erosão do que o Barreiras alterado. Isso é justificado por sua granulometria mais arenosa e seu menor índice de plasticidade e índice de vazios, conforme serão apresentados na Tabela 2.

Os resultados indicam que a declividade, aparentemente, não influencia nos valores das perdas obtidas. No entanto, novos ensaios deverão ser executados a fim de verificar esse comportamento utilizando uma quarta declividade.

### 4.2 - Ensaio Geotécnicos

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados estão apresentados na Tabela 2. As “Figuras 5 e 6” apresentam as curvas granulométricas obtidas para os dois solos estudados com uso de defloculante e sem defloculante. Quanto ao traçado da curva granulométrica, pode-se observar que o Barreiras propriamente dito possui uma granulometria mais arenosa, confirmando seu caráter mais erosivo verificado nos ensaios de erodibilidade sob chuva simulada considerando três repetições.

Dos vários ensaios de limite de consistência executados, obteve-se, para alteração do Barreiras, Limite de Liquidez (LL) médio igual a 37% e Limite de Plasticidade (LP) igual a 21% e Índice de Plasticidade (IP) igual a 16% e para o Barreiras propriamente dito valores de LL igual a 31%, LP igual a 18% e IP igual a 13%. Como pode perceber pelos dados apresentados na

“Figura 7”, os dois solos apresentam-se posicionados na carta de plasticidade dentro da zona de finos com baixa plasticidade (CL). Associando a classificação dos finos com a porcentagem que passa na peneira 200 (> 50%), pôde-se chegar à classificação da SUCS: SC (areia argilosa). No que se refere à classificação da ABNT NBR 6508/2001, os dois solos estudados apresentam nomenclatura, segundo ensaio realizado com defloculante, de areia argilo-siltosa. Segundo ensaio realizado sem defloculante, os percentuais de silte praticamente invertem com os de argila, passando o solo, nesse caso, a ser designado de areia silto-argilosa. Esse fato é melhor ilustrado na “Figura 5 e 6”. Outro ponto a ser observado na Tabela 2 é o teor de agregação, cujo valor é calculado através da relação entre a porcentagem de agregados totais e teor de argila com defloculante. Os valores obtidos para os dois solos são praticamente iguais, mostrando uma homogeneidade entre as duas amostras, embora o solo de alteração do Barreiras já se encontre mais intemperizado e pedologicamente mais evoluído e isso é confirmado, inclusive pela sua cor avermelhada e maior massa específica dos grãos.

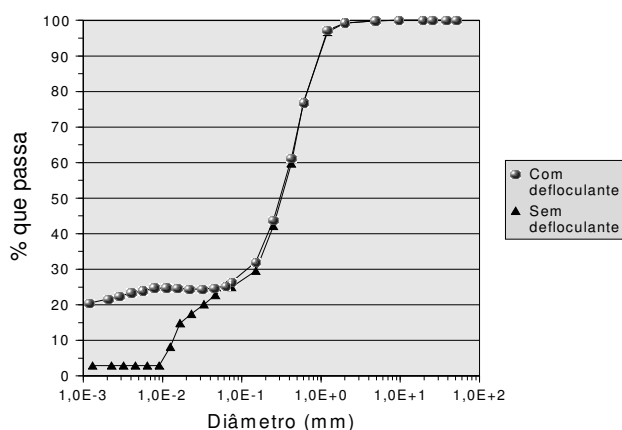
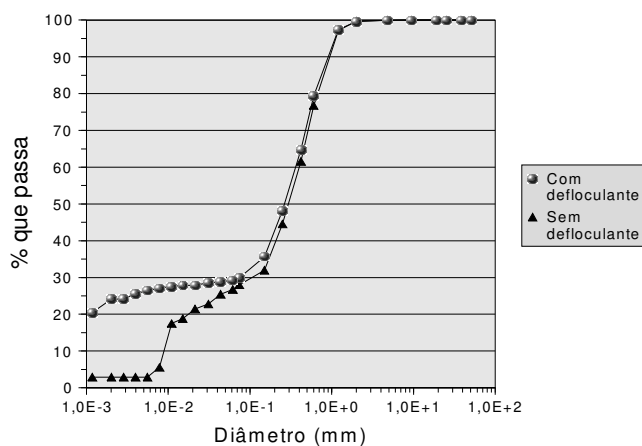


Figura 5 – Curva granulométrica com e sem defloculante para o Barreiras propriamente dito - Blocos 1 e 2.

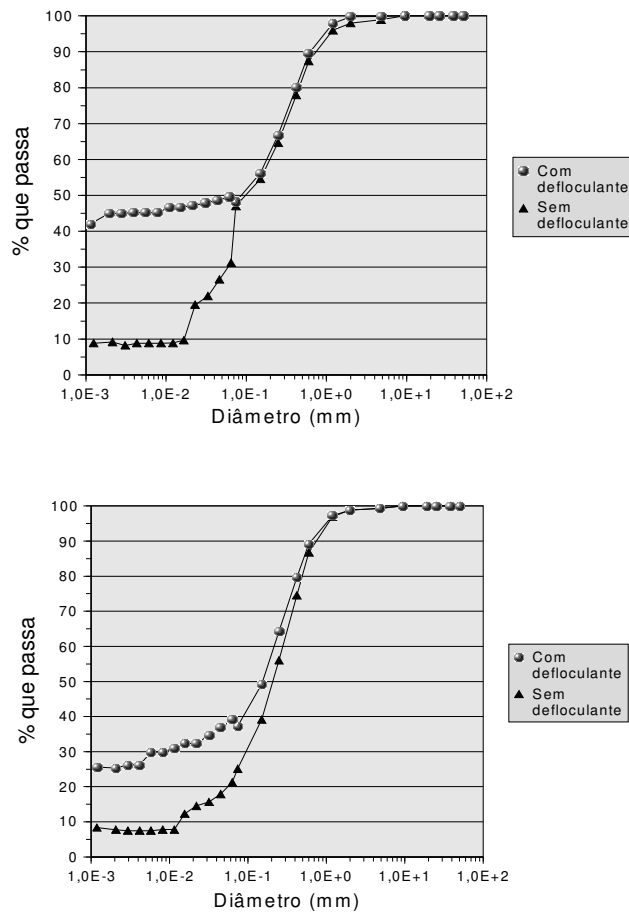


Figura 6 – Curva granulométrica com e sem defloculante para a alteração do Barreiras - Blocos 5 e 7.

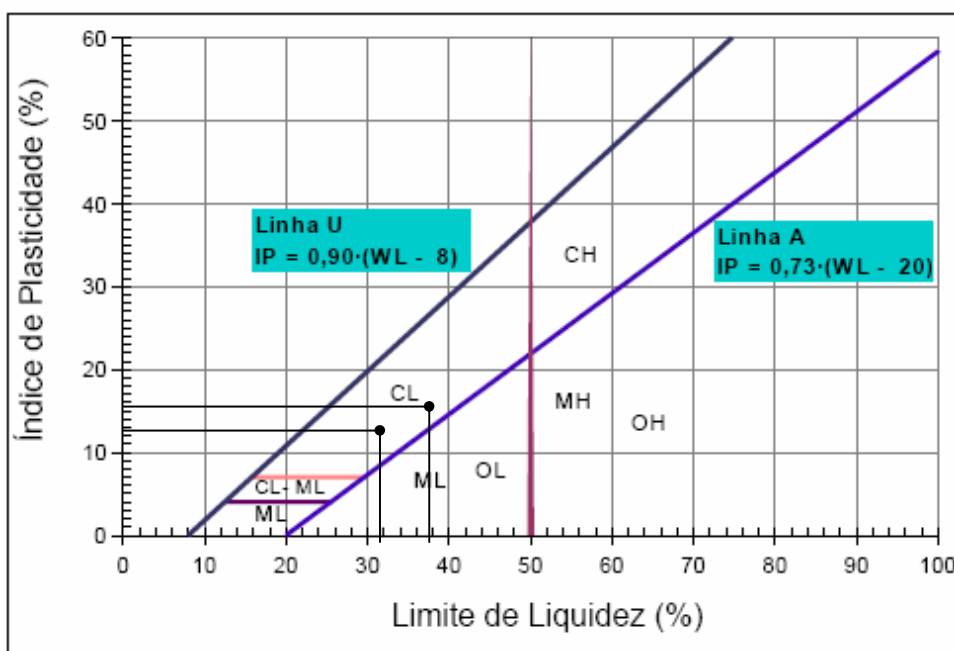


Figura 5 – Carta de plasticidade



Tabela 2 – Resultado dos ensaios geotécnicos.

	W <sub>nat</sub> (%)	ρ <sub>nat</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	e	n	Sr (%)	Análise Granulométrica		Limites			Classificação		Agregados totais (%)	Teor de agregação (%)
							c/ defloc.	s/ defloc.	LL	LP	IP	c/ defloc.	s/ defloc.		
Alteração do Barreiras	11,66	1,750	2,769	0,767	0,434	42,1	P = 1 AG = 12 AM = 27 AF = 16 S = 9 A = 35	P = 2 AG = 9 AM = 24 AF = 45 S = 15 A = 7	37	21	16	areia argilo-siltosa SC	areia silto-argilosa SC	28	0,80
Barreiras propriamente dito	6,34	1,737	2,701	0,654	0,395	26,2	P = 0 AG = 22 AM = 38 AF = 12 S = 5 A = 23	P = 0 AG = 23 AM = 34 AF = 19 S = 22 A = 3	31	18	13	areia argilo-siltosa SC	areia silto-argilosa SC	20	0,87

Com os valores de umidade natural e massa específica do solo, foi possível calcular o índice de vazios e a porosidade do solo de ambos os horizontes. O fato de o Barreiras propriamente dito ser menos poroso indica que esse apresenta maior dificuldade para ser inundado, o que foi confirmado através do ensaio de desagregação onde o mesmo apresentou maior tempo de saturação.

A “Figura 8” apresenta uma vista das amostras submetidas aos ensaios de desagregação, na condição inicial e após 30 minutos do início do ensaio.

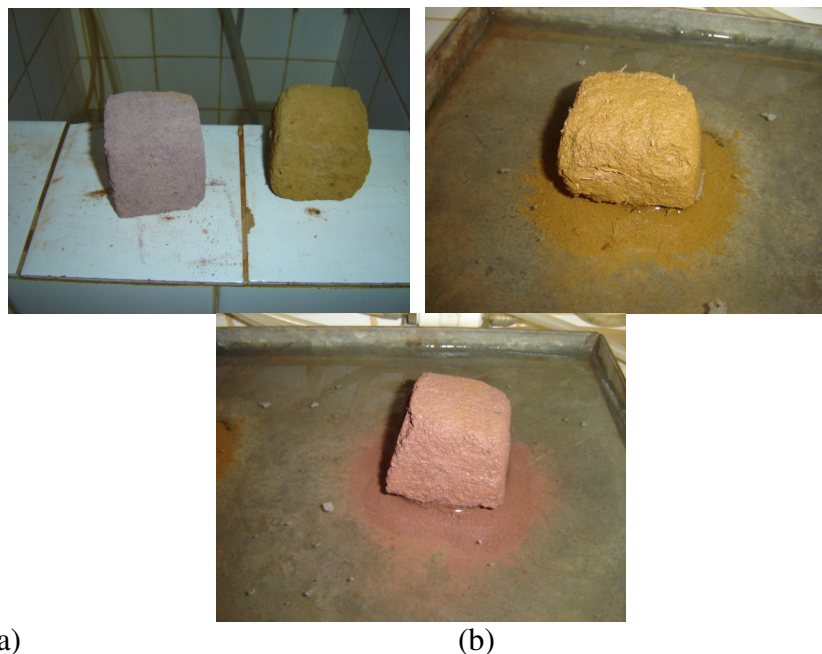


Figura 8 – Ensaio de desagregação – a) condição inicial; b) e c) após 30 minutos.

O ensaio de desagregação mostrou que o solo proveniente da Alteração do Barreiras é menos resistente ao contato com a água, apresentando um menor tempo de saturação conforme mostra a Tabela 3. Esse comportamento está de acordo com sua característica geotécnica para esse horizonte que, além de ser mais poroso, encontra-se mais úmido. Observou-se também que,

depois de saturado, o solo da Alteração do Barreiras tornou-se mais frágil, rompendo-se facilmente quando pressionado.

Tabela 3 – Tempo de saturação das amostras.

Tipo de Solo	Amostras	Tempo de saturação (min)
Barreiras	1	26
	2	30
	3	23
Alteração do Barreiras	1	2
	2	3
	3	7

A “Figura 8” demonstra que ocorreu o desprendimento de algumas partículas de solo da parte que estava submersa, no entanto as amostras não apresentaram significativa desintegração, abatimento, fraturamento ou dispersão durante a realização do ensaio.

Esses resultados, ainda que qualitativos, reforçam as conclusões dos ensaios de erodibilidade com a chuva simulada. Nesses últimos ensaios, obtiveram-se perdas por splash significativamente superiores ao de perdas por lavagem. Como pode perceber, por si só, na condição saturada, o solo não apresentou grande desprendimento de partículas, sendo necessário o impacto da gota de chuva para destacar as partículas e as disponibilizar para o transporte. Acredita-se que, nesse caso, as partículas do solo estão sendo erodidas de forma prioritária pelo efeito da gota – splash.

## 5 - CONCLUSÃO

Os resultados parciais obtidos dessa pesquisa permitiram concluir que a intensidade da chuva tem papel mais significativo no processo erosivo que a declividade do terreno. Os solos da Alteração do Barreiras é menos erodível que o Barreiras propriamente dito. Os resultados de erodibilidade apresentam boa correspondência com as observações qualitativas feitas no ensaio de desagregação. As amostras não apresentaram desprendimento significativo, reforçando a conclusão de que o solo estudado apresenta mais susceptibilidade à erosão por efeito do splash. Acredita-se ser o ensaio de desagregação uma ferramenta interessante no direcionamento e previsão do estudo de erosão, por ser um ensaio fácil e simples de executar. No que se refere às características geotécnicas, os dois horizontes estudados, apresentaram valores muito próximos mostrando uma certa homogeneidade nas propriedades físicas como IP, porosidade, teor de agregação e percentuais granulométricas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapesb – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – pelo suporte financeiro e à UCSal – Universidade Católica do Salvador – pelo apoio logístico no desenvolvimento da pesquisa; à Prefeitura Municipal de Salvador pela disponibilização de dados das áreas de riscos da cidade e à CONDER – Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia e aos Correios pela ajuda na localização das áreas de risco.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459** – Solo – Determinação do limite de liquidez. Out/1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7180** – Solo – Determinação do limite de plasticidade. Out/1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7181** – Solo – Análise granulométrica. Dez/1984

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10838** – Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática. Maio/1988.

BASTOS, C. A. B. et al, Avaliação da Erodibilidade de Perfis de Solos Residuais da Grande Porto Alegre In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1998, Brasília. **Anais**, Brasília: 1998, p 557-563

FERNANDES, D. de O. **Erodibilidade de materiais inconsolidados da bacia do Ribeirão Samambaia** (Região de São Pedro-SP). 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MACHADO, S. L. e MACHADO, M. F. C. **Conceitos Introdutórios – Mecânica dos Solos I.**

PREFEITURA MUNICIPAL DE SALVADOR, **Plano Diretor de Encostas**, Salvador-Ba, 2004.

REGO, J.J.V. **Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de gnaise**, Rio de Janeiro, RJ, Fev. 1978.

SANTOS, R.M.M. e CARVALHO, J.C. **Ensaio de erodibilidade em Voçorocas do Município de Goiânia.** In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1998, Brasília. **Anais**, Brasília: 1998, p 581-588