

O COLAPSO DE UM SOLO ARENOSO INUNDADO COM ESGOTO DOMÉSTICO

The Collapse of a Sandy Soil Saturated with Washwater

Roger Augusto Rodrigues*

José Augusto de Lollo**

RESUMO – Analisa-se o comportamento colapsível de um solo arenoso inundado com esgoto doméstico. O contato do solo com água contendo substâncias dissolvidas pode se dar por meio de vazamentos de produtos orgânicos e inorgânicos que ocorrem em reservatórios de combustíveis e tubulações de esgotos. Na região, estima-se que 35% dos danos provocados pelo colapso dos solos são decorrentes de rupturas de tubulações de esgoto, com significativos prejuízos para a população e o poder público. Apresentam-se aspectos físicos e químicos dos solos e do esgoto, analisam-se a estrutura dos solos e a magnitude do colapso sob influência do esgoto doméstico, considerando dois perfis de solos diferentes. Com base nos resultados dos ensaios obtidos em laboratório, verificou-se que a magnitude do colapso dos solos depende tanto das características químicas e físicas do solo quanto das características químicas dos fluidos de inundação.

SYNOPSIS – This article analyzes the collapsible behavior of a sandy soil saturated with sewage. Pipe ruptures is the most common way of soil contamination and degradation due to organic and inorganic substances. In the studied area a meaningful percentage (over 35%) of soil collapse occurrences were caused by swage pipe ruptures, resulting damages for people and local administration. In order to characterize the involved factors, chemical and physical aspects of soils and sewage being determined. The structure and collapse of soils are studied, considering two different profiles of soils occurring in the area. Obtained results show that collapse magnitude depends on the chemical and physics characteristics of soils and fluid.

1 – INTRODUÇÃO

A proteção do meio ambiente contra as conseqüências adversas da percolação de contaminantes em meios porosos envolve questões fundamentais relacionadas aos condicionantes do meio físico. Dos condicionantes geotécnicos, a colapsibilidade dos solos apresenta relevância na compreensão e avaliação da migração de contaminantes nos solos pela sua potencialidade de promover danos ambientais e prejuízos materiais.

O colapso dos solos pode ser definido como um recalque provocado pela infiltração de um fluido sem que haja variação de sobrecargas, que ao umedecer o solo, proporciona um desequilíbrio estrutural diminuindo a capacidade de sustentação entre suas partículas. A ação do fluido ocasiona a redução dos mecanismos de suporte, fazendo com que as partículas sólidas deslizem em direção aos vazios contidos na camada afetada.

Os solos colapsíveis possuem alguns requisitos básicos que facilitam sua identificação: uma estrutura porosa (caracterizada por um alto índice de vazios), um grau de saturação menor que o necessário para sua completa saturação e uma estrutura metaestável (Dudley, 1970).

Todavia, o comportamento colapsível de um solo não depende apenas destas condições. De acordo com Collares (1997) e Agnelli (1997), diversas pesquisas demonstram que a grandeza do colapso altera-se em função das características químicas dos fluidos de inundação.

* Mestrando, Departamento de Engenharia Civil, FEIS-UNESP – email: roger@dec.feis.unesp.br

** Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, FEIS-UNESP – email: lolloja@dec.feis.unesp.br

Normalmente, os estudos concentram-se na análise da água como permeante, mas diferentes fluidos, oriundos de tubulações da rede de esgoto, reservatórios de combustíveis e efluentes químicos, podem apresentar aspectos diferenciados no processo de colapso.

Na região estudada, estima-se que 35% de ocorrências relacionadas ao colapso dos solos resultam de rupturas de tubulações de esgoto, com prejuízos de ordem econômica e ambiental. Os problemas de danos em canalizações podem ser atribuídos a ataques físico-químicos de agentes externos, esforços mecânicos e recalques de tubulações após reaterro das valas.

Os recalques provocam deformações no perfil longitudinal das tubulações e, por consequência, esforços de flexão e compressão podendo levá-las à ruptura. A ocorrência de qualquer tipo de vazamento, devido a rupturas de tubulações, constitui um evento imprevisível e indesejável aliado sempre a prejuízos, principalmente em terrenos colapsíveis.

Diante deste agravante, torna-se imprescindível analisar o comportamento dos solos inundados com esgoto doméstico associando-o com parâmetros correlatos.

2 – ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na cidade de Ilha Solteira (SP) situada na Região Sudeste do Brasil entre os meridianos 51°00' e 51°30'W e os paralelos 20°15' e 20°45'S. (Figura 1).



Fig. 1 – Localização de Ilha Solteira no Brasil.

Os materiais de origem dos solos predominantes na região são rochas sedimentares (arenitos pertencentes à Formação Santo Anastácio) e intrusivas básicas (basaltos da Formação Serra Geral) sendo que o substrato rochoso composto pelos arenitos ocupa a maior parte da área.

Do ponto de vista pedológico os solos presentes na área podem ser divididos em duas categorias. Enquanto aqueles derivados dos litotipos arenosos compreendem basicamente Podzólicos vermelho amarelos e Latossolos vermelho amarelos e vermelho escuros fase arenosa, os produtos residuais derivados das intrusivas correspondem a Latossolos vermelho escuros argilosos.

Os solos predominantes na área, comumente designados *sedimento cenozóico*, compreendem solos arenosos finos lateríticos, os quais apresentam como principais características: textura tipicamente arenosa, ausência da argilominerais ativos, estrutura porosa e valores elevados de condutividade hidráulica quando em seu estado natural.

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 – Amostragem dos Solos

Selecionou-se dois locais para coleta de amostras deformadas e indeformadas de solos. A definição dos locais apropriados para abertura dos poços de inspeção fundamentou-se na aplicação da técnica de avaliação do terreno efetuada na região por Lollo (1998).

O método de avaliação do terreno baseia-se no reconhecimento, interpretação e análise de feições do relevo as quais, sendo reflexo dos processos naturais atuantes sobre os materiais da superfície terrestre, devem refletir as condições destes materiais.

A técnica de avaliação do terreno auxilia estudos para caracterização do meio físico e permite a adequada aplicação do mapeamento geotécnico ao planejamento territorial devido à boa adaptação ao zoneamento do meio físico (Lollo, 1996).

A escavação dos poços foi realizada com diâmetro de 1 metro e profundidade máxima de 4 metros. A escolha desta profundidade justifica-se pelo grande número de projetos de fundações adotados nesta região, que raramente ultrapassam 4 metros. Além disso, a instalação de tubulações de esgoto nesta profundidade torna-se onerosa pela necessidade de despesas significativas para trabalhos de execução e manutenção.

Os dois poços refletem as duas principais feições de relevo encontradas no município, conforme apresenta a Figura 2.

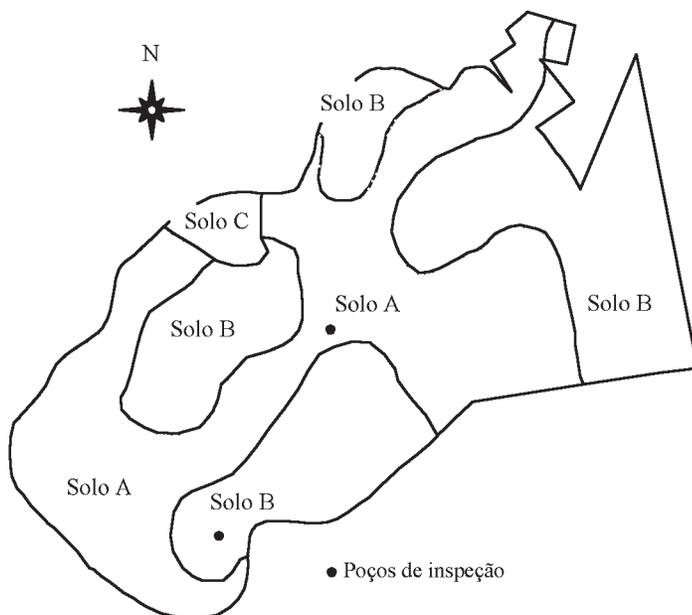


Fig. 2 – Localização dos poços de inspeção e identificação das formas de relevo.

Solo A: Representa as porções inferiores das colinas com formas convexas e média frequência de canais. Os solos são arenosos finos e apresentam perfis de alteração com espessuras sempre inferiores a 10 metros. Dados de sondagens à percussão realizadas na área mostram uma camada superior com valores de NSPT inferiores a 8 golpes seguido de uma linha de seixos com espessura centimétrica e sobrepostos a solos residuais com maiores índices de compactidade (N_{SPT} entre 15 e 20 golpes).

Solo B: Representa a metade superior e topo de colinas com formas convexas e topos relativamente aplainados e baixa frequência de canais. Os perfis apresentam materiais arenosos fofos com espessuras comumente superiores a 20 metros. Os dados de sondagem mostram uma camada

mais superficial do perfil de solo com valores de N_{SPT} inferiores a 10 golpes com espessuras de até 14 metros sobreposta a uma linha de seixos centimétrica e a nova camada de solo arenoso fino com maiores valores de compactidade (N_{SPT} entre 10 e 15 golpes).

Solo C: Representa a porção inferior das encostas com formas retilíneas evoluindo para cêncavas, bastante íngremes, com alta frequência de canais e intenso ravinamento. Os materiais inconsolidados são pouco espessos variando entre 2 e 5 metros. Ensaios preliminares de laboratório indicaram que tal solo não apresenta comportamento colapsível, razão pela qual o mesmo não é considerado no presente trabalho.

3.2 – Amostragem do Esgoto Doméstico

As amostras de esgoto foram coletadas numa estação elevatória do município. Para cada ensaio edométrico previsto, o esgoto foi retirado na entrada do sistema da estação em recipientes plásticos com capacidade para 3 litros. As amostras de esgoto coletadas serviram para a caracterização do esgoto e inundação do solo quando da realização dos ensaios de laboratório.

As águas provenientes da rede coletora de esgoto sofrem significativas modificações no decorrer do dia. Durante o período de 24 horas, os esgotos apresentam diferentes concentrações de DBO e DQO (demanda química e bioquímica de oxigênio), de sólidos, de amônia e de nitrogênio conforme são apresentadas nas Figuras 3 e 4 (os parâmetros apresentados foram determinados de acordo com a metodologia Hach por espectrofotometria).

Nesta região, o intervalo do período em que o esgoto doméstico apresenta-se mais concentrado alterna-se entre 8 e 10 horas. Estas concentrações estão diretamente relacionadas com a quantidade de despejos domésticos que são lançados pela população nestes horários.

Devido às variações mencionadas, as amostras de esgoto foram coletadas nos horários de maiores concentrações dos principais parâmetros de caracterização. Os horários selecionados de coleta para inundação do solo foram 8:00, 9:00 e 10:00 horas. Em cada um destes horários o recipiente plástico foi preenchido com a terça parte do volume total e por fim homogeneizado.

Para evitar a obstrução dos vazios dos solos, durante a realização dos ensaios edométricos, a fração particulada do esgoto (sólidos em suspensão) foi separada por processo de filtração.

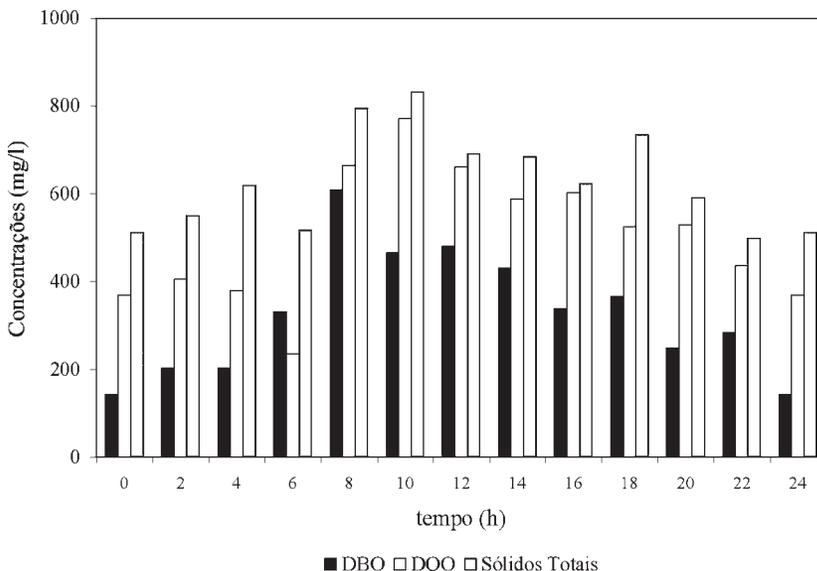


Fig. 3 – Concentrações de DBO, DQO e sólidos totais durante 24 horas.

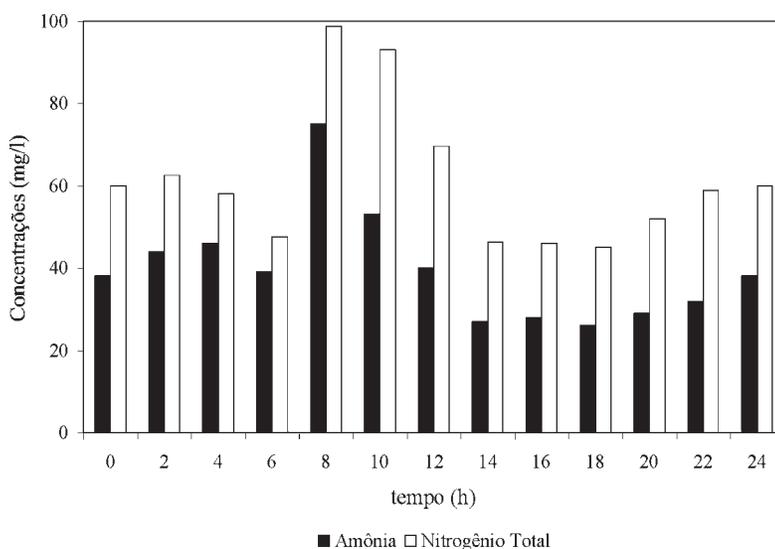


Fig. 4 – Concentrações de amônia e nitrogênio durante 24 horas.

3.3 – Características Físicas dos Solos

Na Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização. Trata-se de uma areia argilosa com estrutura porosa ($n > 40\%$) e que apresenta baixo grau de saturação ($S_r < 60\%$). Os Solos A e B apresentam as mesmas características físicas. A diferença entre os perfis restringe-se à espessura da camada com menor compactidade (camada mais superficial dos perfis).

Tabela 1 – Características físicas dos Solos A e B.

Solo	Prof. (m)	ρ	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s	w (%)	e	S_r (%)	Granulometria (%)			Limites de Consistência (%)		
								Argila	Silte	Areia	LL	LP	IP
A	1	1,56	1,43	2,68	9,2	0,88	28,0	27	8	65	24,7	14,6	10,1
	2	1,55	1,40	2,70	10,6	0,92	30,9	28	9	63	24,6	14,3	10,3
	3	1,70	1,54	2,72	10,5	0,77	37,1	28	12	60	24,2	14,5	9,7
	4	1,68	1,50	2,71	12,2	0,81	40,9	27	12	61	24,3	14,0	10,3
B	1	1,53	1,42	2,72	8,2	0,92	24,4	27	11	62	24,5	15,7	8,7
	2	1,56	1,41	2,71	10,2	0,91	30,3	20	16	64	24,8	15,4	9,4
	3	1,64	1,47	2,72	11,6	0,85	37,2	24	16	60	24,3	15,2	9,1
	4	1,63	1,47	2,72	10,7	0,85	34,3	22	21	57	24,2	14,8	9,4

Legenda: Prof.: profundidade; ρ : massa específica; ρ_d : massa específica seca; ρ_s : massa específica dos sólidos; w: umidade; e: índice de vazios; S_r : grau de saturação; LL: limite de liquidez; LP: limite de plasticidade; e IP: índice de plasticidade.

3.4 – Características Químicas dos Solos

A análise química dos solos estendeu-se até 4 metros sob duas condições: (1) amostra com umidade natural e (2) amostra inundada com esgoto doméstico. Dos resultados obtidos é possível constatar que:

- (1) Os solos analisados possuem características típicas de solos laterizados que passaram por intenso processo de lixiviação. Nestes solos ocorre, principalmente nas camadas menos profundas, o arraste de bases por precipitação, possibilitando a acidificação e a formação de uma estrutura floculada;
- (2) A baixa quantidade de sódio indica a formação de uma estrutura floculada. Segundo Agnelli (1997), a defloculação será tanto maior e mais rápida, quanto maior for à quantidade de sódio presente no líquido inundante, que é o elemento químico predominante nas águas sanitárias e nos sabões. Analisando-se na Tabela 2 nota-se que as amostras inundadas com esgoto doméstico sofreram um acréscimo considerável de sódio, sugerindo indiretamente a presença deste cátion no fluido de inundação.
- (3) A capacidade de troca catiônica dos solos analisados varia de 16,6 a 43,1 mmol_c/l ou (1,66 a 4,31 meq/100ml de solo). Esta faixa de valores prescreve a caulinita como argilomineral predominante destes solos.
- (4) O pH dos solos analisados encontra-se em pequenos intervalos de variação para os solos dos dois poços de inspeção. O Solo A apresenta-se mais ácido (pH = 4) em condições naturais. Já o Solo B, possui pH = 6 nas subcamadas até 2 metros de profundidade, porém, a 3 e 4 metros seus valores de pH são semelhantes ao Solo A.
- (5) A quantidade de matéria orgânica M.O. situa-se de 1 a 8 g/l e 1 a 7 g/l para os Solos A e B, respectivamente. O horizonte superior possui o maior teor de matéria orgânica para os dois solos decrescendo com a profundidade.

Tabela 2 – Características químicas dos Solos A e B.

Solo	Condição de Saturação	Prof. (m)	Na (m)	K (m)	Ca (m)	Mg (m)	H+Al (mmol _c /l)	Al (mmol _c /l)	SB (mmol _c /l)	CTC (mmol _c /l)	M.O. (g/l)	V (%)	pH em CaC ₁₂
A	natural	1	0,01	0,1	10	4	25	4	14,1	39,1	8	36	4,3
	natural	2	0,01	0,1	2	2	25	10	4,1	29,1	4	14	3,9
	natural	3	0,02	0,1	3	2	16	4	4,5	20,5	2	22	4,1
	natural	4	0,03	0,1	2	1	16	5	3,7	19,7	1	19	4,1
	c/ esgoto	1	0,17	0,4	12	4	20	1	17,2	37,2	7	46	4,8
	c/ esgoto	2	0,19	0,4	3	2	20	5	5,6	25,6	4	22	4,3
	c/ esgoto	3	0,20	0,3	3	2	13	1	5,1	18,1	2	28	4,9
	c/ esgoto	4	0,20	0,4	2	2	13	1	4,0	17,0	1	23	4,8
B	natural	1	0,03	0,1	28	4	11	0	32,1	43,1	7	74	6,1
	natural	2	0,02	0,1	10	6	10	0	16,1	26,1	3	62	6,2
	natural	3	0,01	0,2	1	2	16	5	3,6	19,6	2	18	4,1
	natural	4	0,01	0,1	1	1	16	7	2,3	18,3	1	13	4,0
	c/ esgoto	1	0,17	0,4	25	4	10	0	29,4	39,4	5	75	6,5
	c/ esgoto	2	0,14	0,4	10	7	10	0	17,0	27,0	3	63	6,5
	c/ esgoto	3	0,18	0,4	2	3	13	5	5,0	18,0	2	28	4,9
	c/ esgoto	4	0,20	0,4	2	1	13	2	3,6	16,6	1	21	4,5

Legenda: Prof.: profundidade; Na, K, Ca e Mg: cátions básicos (sódio, potássio, cálcio e magnésio); H + Al: cátions ácidos (hidrogênio + alumínio); SB: soma de bases (SB = Na + K + Ca + Mg); CTC: capacidade de troca catiônica (CTC = Na + K + Ca + Mg + H + Al); MO: matéria orgânica; V: saturação de bases (V = 100*SB/CTC); e pH: potencial hidrogeniônico.

3.5 – Características do Esgoto Doméstico

A análise da qualidade dos esgotos normalmente envolve a definição de parâmetros que indicam o grau de comprometimento das águas residuárias instruindo sobre o tipo de esgoto e sua

capacidade de contaminação. Segundo von Sperling (1996), estas informações são necessárias para avaliar o esgoto e suas principais características. Os Quadros 3a e 3b fornecem as características do esgoto doméstico.

Tabela 3a – Características do esgoto doméstico.

Sólidos Totais (mg/l)	Sólidos Totais Fixos (mg/l)	Sólidos Totais Voláteis (mg/l)	Sólidos Suspensos (mg/l)	Sólidos Suspensos Fixos (mg/l)	Sólidos Suspensos Voláteis (mg/l)	Tensão Superficial (10^{-2} N/m)	Massa Específica (g/cm^3)
822,6	251,6	571,0	153,9	18,9	136,7	5,23	1,0123

Os sólidos totais presentes nos esgotos domésticos normalmente são inferiores a 0,1% do volume total do efluente. Entretanto, para inundação do solo, recorreu-se à filtração para remoção dos sólidos em suspensão. A opção em removê-los, utilizando-se apenas os sólidos dissolvidos, decorre da possibilidade de obstrução dos vazios do solo pelas partículas do esgoto durante os ensaios edométricos.

Ressalta-se que, com a filtragem do esgoto, alguns parâmetros se alteram significativamente. É o caso, por exemplo, da demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), como pode ser verificado na Tabela 3b.

Tabela 3b – Características do esgoto doméstico.

Nitrogênio Total (mg/l)	Amônia (mg/l)	Detergente (mg/l)	DBO bruto (mg/l)	DBO filtrado (mg/l)	DQO bruto (mg/l)	DQO filtrado (mg/l)	pH	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
84,1	59,7	0,189	295,2	181,3	644,0	319,1	7,3	29,0

Os valores expostos nas Tabelas 3a e 3b correspondem a médias obtidas através de determinações semanais que se estenderam por 4 meses (Março a Julho de 2002). Neste período realizaram-se os ensaios edométricos inundados com os esgotos coletados. Nas Figuras 3 e 4, as concentrações, porém, são diferentes às apresentadas nos Quadros 3a e 3b, pois a caracterização apresentada nas figuras foi realizada em outra época do ano, que resultou num aumento das concentrações.

Durante o período de coleta do material, o esgoto apresentou temperatura média de 29°C , cerca de 2°C superior à água de abastecimento público. Esta variação pode ser atribuída à contribuição de despejos domésticos que tiveram suas águas aquecidas.

Com a temperatura de 29°C , verificou-se a tensão superficial e a massa específica do esgoto e da água destilada, que serviu como parâmetro de comparação na análise dos solos frente a colapsibilidade.

A tensão superficial da água destilada a 29°C é $7,42 \cdot 10^{-2}$ N/m, enquanto o esgoto doméstico apresenta $5,23 \cdot 10^{-2}$ N/m. A redução da tensão superficial do esgoto normalmente ocorre pela presença de sabões e detergentes dissolvidos. Os sabões e detergentes possuem tensoativo aniônico que abaixa a tensão superficial. Contudo, a quantidade de detergentes dissolvidos no esgoto é baixa, cerca de 0,189 mg/l.

A massa específica da água a 29°C é $0,9960 \text{ g/cm}^3$ e do esgoto $1,0123 \text{ g/cm}^3$. Esta diferença, embora pouco significativa, pode ser decorrente dos sólidos suspensos e dissolvidos no esgoto que aumentam sua massa específica.

3.6 – Caracterização Reológica do Esgoto Doméstico

O esgoto doméstico possui substâncias que merecem investigação como sabões, detergentes, óleos e graxas, embora a quantidade destes compostos seja pequena na solução, mesmo encontrando-se combinadas.

Neste contexto, torna-se necessário conhecer as propriedades físicas do esgoto, e compará-las com as propriedades da água, pois algumas variáveis podem influenciar na forma e na velocidade de infiltração do fluido nas amostras de solos. Os ensaios de reometria servem para caracterizar o comportamento de fluidos em termos da relação entre as variáveis, tensão de cisalhamento, viscosidade aparente e tensão crítica de escoamento, e a taxa de deformação do fluido.

A Figura 5 ilustra as características reológicas do esgoto doméstico utilizando-se ensaios laboratoriais com o R/S Rheometer da Brookfield Engineering associado a uma câmara térmica para manter constante a temperatura da amostra durante os ensaios e o software Rheo 2000 que auxilia na obtenção e interpretação dos resultados.

O uso adequado deste conjunto de acessórios associado ao reômetro proporciona melhores ajustes das equações utilizadas na aplicação dos modelos reológicos dos fluidos.

A equação característica obtida apresenta r^2 (coeficiente de determinação) igual a 0,9957 para o esgoto doméstico, demonstrando boa aproximação dos dados experimentais ajustados ao modelo que representa os fluidos newtonianos, conforme a descrição da equação 1. Para os fluidos newtonianos a tensão crítica de cisalhamento é próxima de zero.

$$\tau = \mu \cdot \gamma^* + \tau_c \tag{1}$$

em que, τ : tensão de cisalhamento;

μ : viscosidade;

γ^* : taxa de deformação;

τ_c : tensão crítica de cisalhamento.

O valor de viscosidade alcançado foi de 0,001 Pa.s, tendo tal valor se mantido constante durante as deformações ocorridas no fluido pela aplicação das tensões. O termo independente da equação aproxima-se de zero, ou seja, o esgoto testado não possui tensões críticas de cisalhamento, tratando-se, portanto, de um fluido com comportamento newtoniano. Os dados experimentais apresentados na Figura 5 se ajustam à equação 1, demonstrando que as características de viscosidade e deformabilidade do esgoto são similares às características da água.

Durante o ensaio de reometria, a viscosidade dinâmica é medida ao longo do tempo e durante a variação da taxa de deformação com a aplicação das tensões cisalhantes. Na Figura 5, a viscosidade manteve-se constante durante ensaio, 1.10^{-3} Pa.s, indicando novamente se tratar de um fluido com comportamento newtoniano.

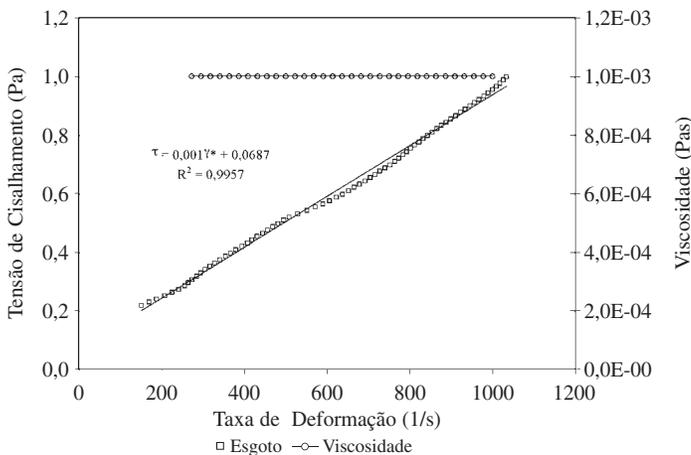


Fig. 5 – Comportamento tensão de cisalhamento e viscosidade vs taxa de deformação do esgoto doméstico a 29°C.

3.7 – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mediante os ensaios de microscopia, constatou-se que a estrutura dos solos estudados é formada por partículas de areia, em alguns casos com formato subangular, apresentando-se circundadas por partículas de argila e silte em estado floculado. A granulometria existente nestes solos é distinta daquela que se encontra com o uso de defloculantes, pois a fração fina do solo, por estar floculada, ocupa a posição de partículas maiores na escala granulométrica.

As Figuras 6 e 7 mostram solos na profundidade de 1 metro com ampliações de 155 e 220 vezes, respectivamente. Os gráficos obtidos pelo espectrômetro de energia dispersiva indicam semiquantitativamente a presença marcante de silício, alumínio e oxigênio.

As Figuras 8 e 9 ilustram o efeito do esgoto doméstico na defloração dos solos finos. A Figura 8 apresenta o solo com estrutura original (indeformada) a 4 metros de profundidade e a Figura 9 apresenta o mesmo solo inundado com esgoto a tensão de 200 kPa. A quebra parcial dos flocos ocorreu pela ação do fluido e pela consolidação do solo no ensaio edométrico.

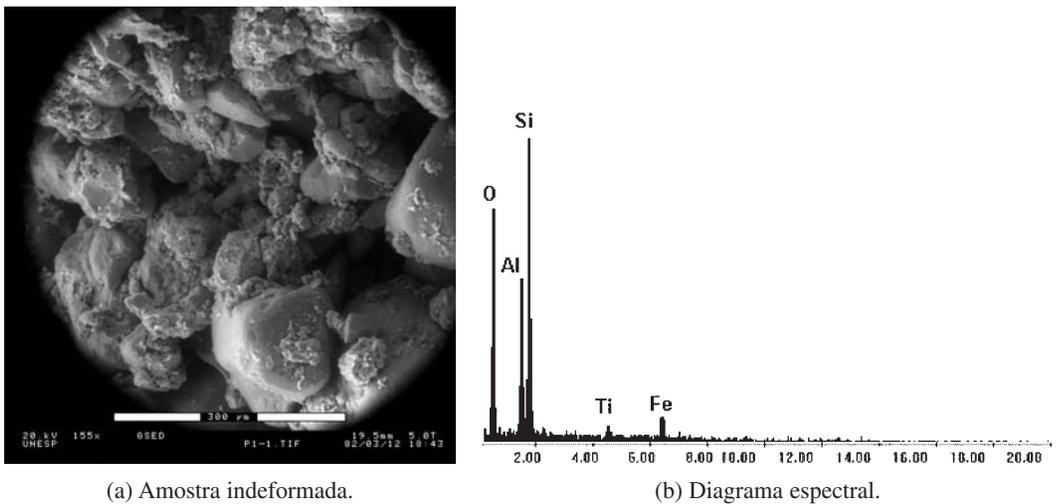


Fig. 6 – Solo A a 1 metro.

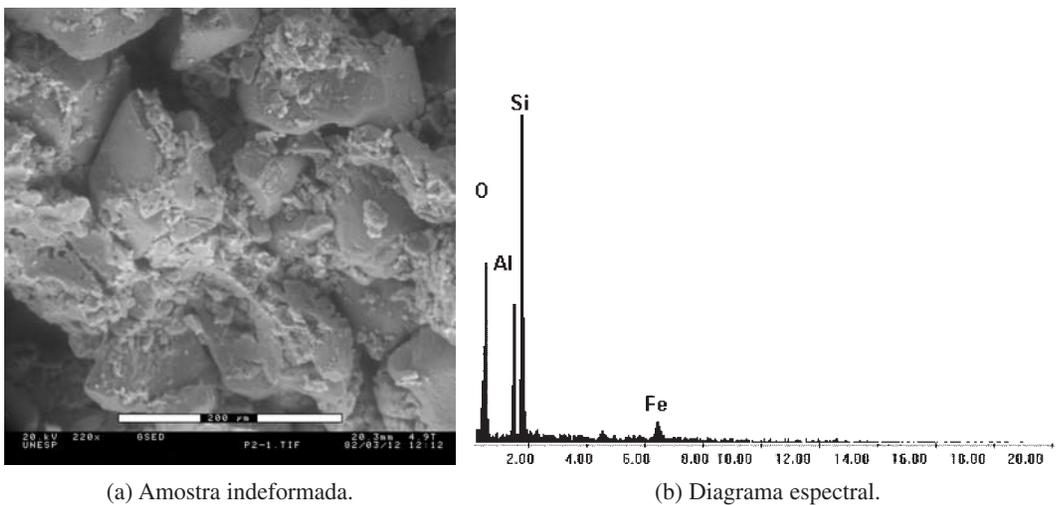
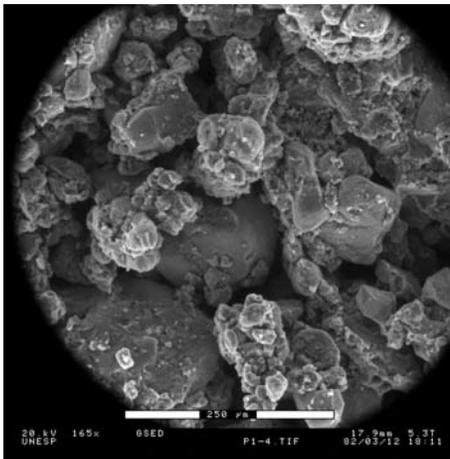
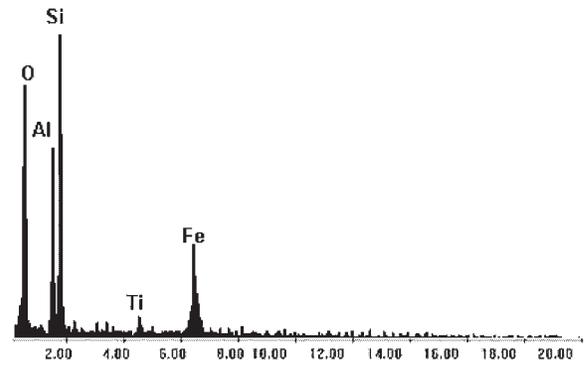


Fig. 7 – Solo B a 1 metro.

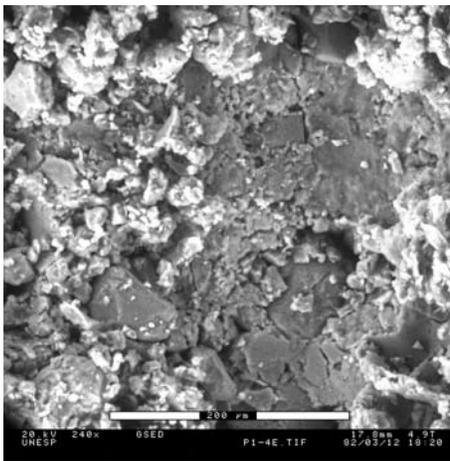


(a) Amostra indeformada.

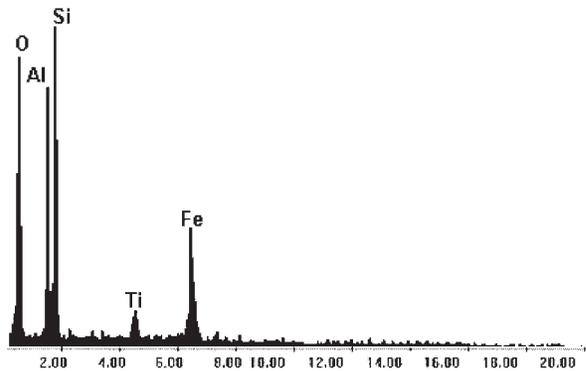


(b) Diagrama espectral.

Fig. 8 – Solo A a 4 metros.



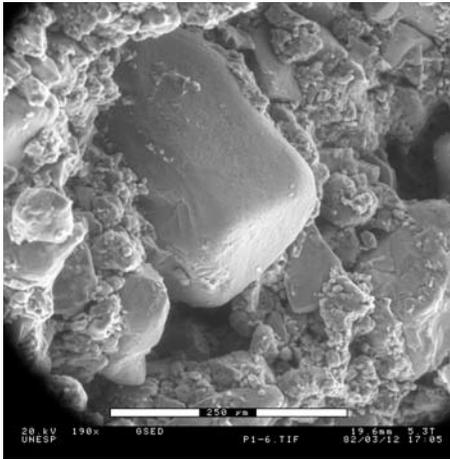
(a) Amostra indeformada.



(b) Diagrama espectral.

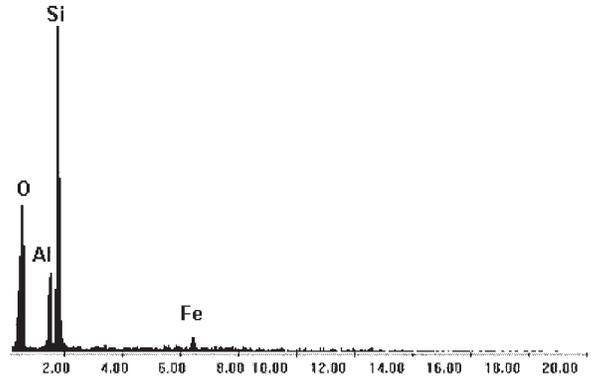
Fig. 9 – Solo A a 4 metros.

A Figura 10 apresenta uma amostra do Solo A com baixa porosidade, coletado a 6 metros de profundidade. A Figura 11 ilustra, com ampliação de 1250 vezes, flocos parcialmente saturados deste solo.



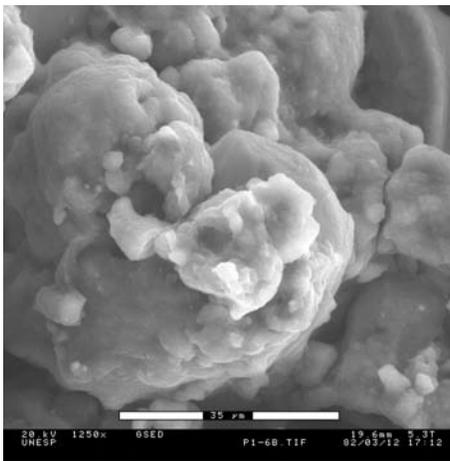
(a) Amostra indeformada.

(a área destacada é reproduzida na Fig. 11)

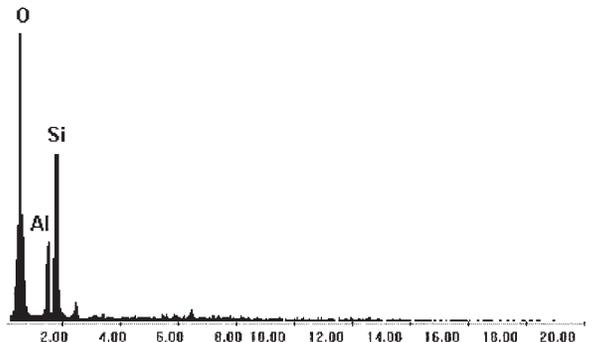


(b) Diagrama espectral.

Fig. 10 – Solo A a 6 metros.



(a) Amostra indeformada.



(b) Diagrama espectral.

Fig. 11 – Solo A a 6 metros.

3.8 – Ensaios Edométricos

O ensaio edométrico é o mais empregado para caracterizar o colapso em laboratório. Este ensaio leva em consideração as deformações axiais provocadas pela inundação dos corpos-de-prova sob um estado de tensões, podendo ser executado de duas maneiras.

A primeira delas consiste em preparar uma amostra de solo que é solicitada até uma tensão de interesse e posteriormente inundada, tal procedimento é designado ensaio edométrico simples. A segunda maneira consiste em preparar duas amostras de solo, sendo uma com o teor de umidade de

interesse e a outra inundada desde o início do ensaio para serem simultaneamente ensaiadas, sendo denominado ensaio edométrico duplo.

O critério adotado para o estudo da colapsibilidade dos solos nos ensaios edométricos simples baseou-se no potencial de colapso (I) sugerido por Lutenegeger e Saber (1988):

$$I = \frac{\Delta H_i}{H_{ai}} \cdot 100\% \quad (2)$$

em que, ΔH_i : variação da altura do corpo-de-prova pela inundação;

H_{ai} : altura do corpo-de-prova antes da inundação.

Para estudar a máxima diferença entre os potenciais de colapso induzidos pela inundação do solo com esgoto e água, optou-se pelo umedecimento do solo a 200 kPa. Testes iniciais indicaram que as maiores deformações ocorridas correspondiam à tensão de 200 kPa, além disso, a tensão de inundação escolhida situa-se no trecho de compressão virgem, localizando-se fora da região em que o solo se encontra pré-adensado.

Na Tabela 4 encontram-se resumidas as principais características dos ensaios edométricos simples.

Tabela 4 – Características dos ensaios edométricos simples dos Solos A e B.

Solo	Inundação	Prof. (m)	w (%)	e_i	σ_i (kPa)	H_{ai} (mm)	ΔH_i (mm)	I (%)
A	Água	1	10,3	0,92	200	18,473	1,529	8,28
	Esgoto	1	10,1	0,91	200	18,675	2,267	12,14
	Água	2	10,3	0,88	200	18,419	1,794	9,74
	Esgoto	2	10,1	0,92	200	18,553	2,271	12,24
	Água	3	9,9	0,79	200	18,808	1,009	5,36
	Esgoto	3	10,2	0,72	200	19,046	1,309	6,87
	Água	4	12,4	0,85	200	18,975	1,078	5,68
	Esgoto	4	12,2	0,82	200	19,053	0,884	4,64
B	Água	1	10,0	0,95	200	17,856	1,606	8,99
	Esgoto	1	10,1	0,93	200	17,580	1,609	9,15
	Água	2	10,2	0,91	200	18,228	1,739	9,54
	Esgoto	2	10,2	0,90	200	18,124	1,610	8,88
	Água	3	11,5	0,83	200	18,565	0,839	4,52
	Esgoto	3	11,6	0,84	200	18,479	0,984	5,32
	Água	4	10,1	0,88	200	18,762	1,114	5,94
	Esgoto	4	9,6	0,81	200	18,948	1,091	5,76

Legenda: w: umidade inicial; e_i : índice de vazios inicial; σ_i : tensão de inundação; H_{ai} : altura do corpo-de-prova antes da inundação; ΔH_i : variação da altura do corpo-de-prova devido ao colapso; I: potencial de colapso.

Para os ensaios edométricos duplos as análises foram realizadas com o auxílio do conceito de deformabilidade volumétrica (ϵ_v), correspondente as variações de volume provocadas pela inundação e aplicação de tensões até 800 kPa.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \% \quad (3)$$

em que, ϵ_v : deformação volumétrica específica

ΔV : variação de volume devido a inundação e aplicação de tensões

V_0 : volume inicial

Na Tabela 5 apresenta resumidamente as principais características dos ensaios edométricos duplos inundados com água e esgoto doméstico para os Solos A e B.

Tabela 5 – Características dos ensaios edométricos duplos dos Solos A e B.

Solo	Inundação	Prof. (m)	w (%)	e_i	S_{ri} (%)	S_{rf} (%)	ϵ_v (%)
A	Água	1	10,2	0,84	32,4	100	23,03
	Esgoto	1	10,1	0,90	30,2	100	25,96
	Água	2	10,3	0,96	28,8	93,6	24,49
	Esgoto	2	10,3	0,94	30,6	100	25,83
	Água	3	10,9	0,76	39,0	100	21,31
	Esgoto	3	10,2	0,82	36,4	100	18,87
	Água	4	11,9	0,81	40,0	95,8	18,12
	Esgoto	4	12,0	12,0	0,76	42,9	92,7
B	Água	1	10,1	0,96	27,5	100	24,65
	Esgoto	1	10,0	0,85	31,7	97,3	23,92
	Água	2	10,3	0,93	30,1	100	25,63
	Esgoto	2	10,0	0,91	29,9	98,5	24,36
	Água	3	11,6	0,82	38,5	95,7	19,67
	Esgoto	3	11,7	0,89	35,5	99,1	23,28
	Água	4	11,9	0,86	37,5	100	20,36
	Esgoto	4	11,8	11,8	0,85	37,7	98,3

Legenda: w: umidade inicial; e_i : índice de vazios inicial; S_{ri} : grau de saturação inicial; S_{rf} : grau de saturação final; ϵ_v : deformação volumétrica específica.

As Figuras 12 e 13 exibem curvas edométricas de corpos-de-prova dos Solos A e B inundados com água e esgoto. Os gráficos de compressão edométrica relacionam as tensões (kPa) em escala logarítmica com as deformações axiais (%).

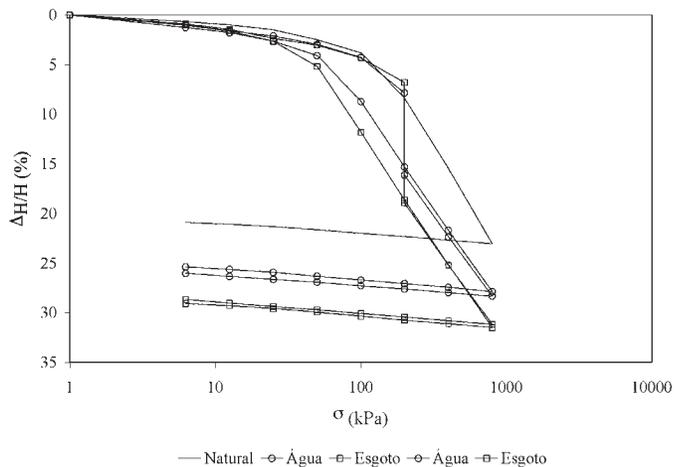


Fig. 12 – Curvas de compressão confinada do Solo A a 1 metro de profundidade.

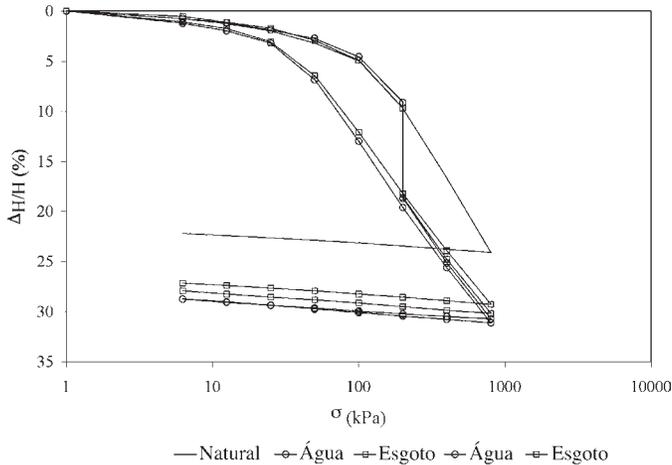


Fig. 13 – Curvas de compressão confinada do Solo B a 1 metro de profundidade.

As Figuras 14 e 15 apresentam os potenciais de colapso em função da profundidade para os Solos A e B. Nestas figuras observa-se a redução dos potenciais de colapso com a profundidade para as duas curvas que representam os fluidos de inundação. Este efeito é resultado da consolidação do solo nos horizontes mais profundos, que garante aos solos estruturas mais densas e estáveis.

O maior benefício apresentado pela consolidação do material é a redução dos potenciais de colapso, não eliminando os colapsos, uma vez que a camada colapsível deste solo ultrapassa 4 metros de profundidade (Rodrigues, 2000).

Na Figura 14, as diferenças entre os potenciais de colapso nas duas curvas são significativamente maiores na superfície, decrescendo com a profundidade. A causa deste fenômeno pode estar associada ao arraste de bases que ocorre pelas águas de infiltração, principalmente nas camadas menos profundas, tornando o solo lixiviado. O processo de lixiviação pode flocular os solos tornando-os ácidos com estruturas metaestáveis.

Quando um líquido, como o esgoto doméstico, com certa quantidade de sódio infiltra no solo, o colapso pode tornar-se maior devido a defloculação dos solos finos. Esta constatação torna-se legítima ao se analisar os resultados dos ensaios químicos, nos quais os solos umedecidos com esgoto apresentaram um aumento significativo de sódio quando comparado com o teor original de sódio dos solos em estado natural (sem inundação).

As diferenças entre os potenciais de colapso dos solos inundados com a água e esgoto, apresentados na Figura 14, não ocorrem para o Solo B nos dois primeiros metros do perfil (Figura 15).

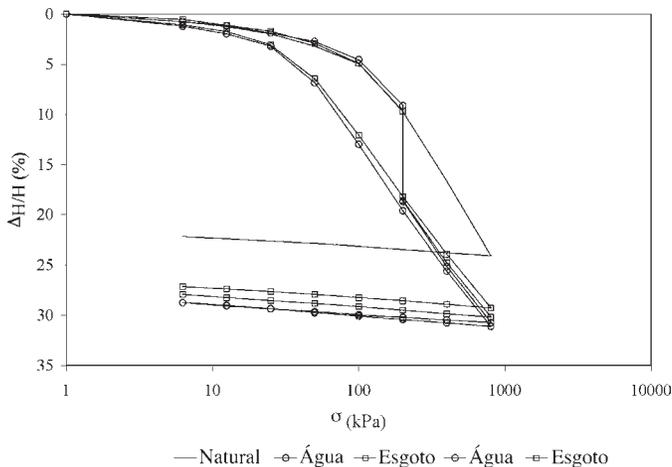


Fig. 14 – Profundidade vs potenciais de colapso do Solo A.

Até 2 metros, os potenciais de colapso gerados pelos dois líquidos não apresentam grandes variações.

A área escolhida para a coleta do Solo B apresenta outra formação fisiográfica. Enquanto o Solo A é definido como materiais inferiores de colinas de formas convexas, o Solo B representa a parte superior e topo das colinas com formas convexas e topo relativamente aplainado. A formação do Solo B caracteriza-se pela maior capacidade de promover escoamento das águas precipitadas. Portanto, este solo tende a ser menos lixiviado, o que poderia explicar menores variações dos potenciais de colapso induzidos pelo umedecimento dos solos com água e esgoto.

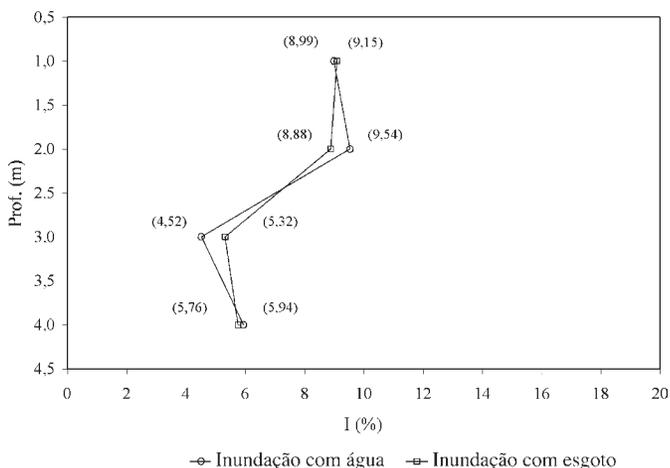


Fig. 15 – Profundidade vs potenciais de colapso do Solo B.

Quando sobrepostos os dois gráficos das Figuras 14 e 15 nota-se que as alterações resultantes das quatro curvas concentram-se nos potenciais de colapso obtidos pela inundação do Solo A com esgoto doméstico, a 1 e 2 metros de profundidade.

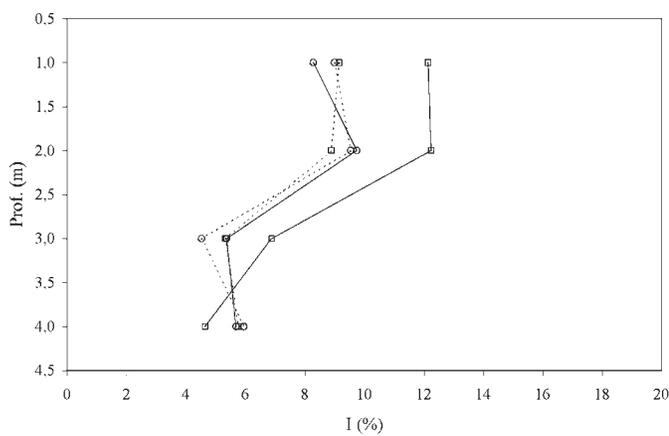
Com isto, os resultados indicam que o colapso ocorre variando sua intensidade ao longo dos perfis. Porém, parecem existir fatores que influenciam grandes variações de potenciais de colapso induzidos pela inundação com água e esgoto nos solos menos profundos, se comparadas as quatro curvas da Figura 16.

A maior diferença entre os perfis dos Solos A e B encontra-se na composição química dos solos. Os resultados apresentados dos ensaios de caracterização dos Solos A e B exibem semelhanças entre os índices físicos, composição granulométrica e limites de consistência. Contudo, quando se comparam suas composições químicas, percebe-se que não se tratam do mesmo solo a 1 e 2 metros de profundidade.

Já a 3 e 4 metros de profundidade existem semelhanças na composição química e potenciais de colapso, além das características físicas mencionadas (índice de vazios, composição granulométrica e limites de consistência).

Na Tabela 6 apresenta o colapso devido à inundação com água e esgoto em função do tempo. A velocidade dos colapsos promovidos pelos dois fluidos (água e esgoto) pode ser visualizada na Figura 17. Além da intensidade dos recalques por colapso (medidos em milímetros) apresentados na Figura 17, observa-se no Quadro 6 a velocidade dos colapsos em termos percentuais com relação ao colapso total.

O solo inundado com esgoto doméstico recalcou 97,1% do colapso total 9 minutos após a inundação, enquanto o solo inundado com água recalcou 95,3%. Esta diferença indica uma velocidade maior do colapso provocado pela inundação com o esgoto.



—○— Solo A (água) —□— Solo A (esgoto) ···· Solo B (água) ···· Solo B (esgoto)

Fig. 16 – Profundidade vs potenciais de colapso para os Solos A e B.

Tabela 6 – Colapso em função do tempo.

Tempo (min)	Colapso (mm) solo inundado com Água	% de Colapso solo inundado com Água	Colapso (mm) solo inundado com Esgoto	% de Colapso solo inundado com Esgoto
9,0	1,457	95,3	2,202	97,1
16,0	1,477	96,6	2,215	97,7
25,0	1,483	97,0	2,222	98,0
36,0	1,488	97,3	2,226	98,2
49,0	1,492	97,6	2,230	98,4
64,0	1,494	97,7	2,233	98,5
100,0	1,499	98,0	2,237	98,7
121,0	1,501	98,2	2,240	98,8
144,0	1,503	98,3	2,242	98,9
196,0	1,505	98,4	2,245	99,0
400,0	1,516	99,1	2,253	99,4
1440,0	1,529	100,0	2,267	100,0

A diferença de velocidade de colapso condiz com as afirmações de Agnelli (1997), indicando que a defloculação da fração fina do solo é maior e mais rápida, quanto maior for a quantidade de sódio presente no líquido inundante, que é o elemento químico predominante nas águas sanitárias e nos sabões.

No entanto, a diferença diminui com o decorrer do tempo, pois a variação que ocorria entre os dois recalques (com água e esgoto) no tempo de 9 minutos (cerca de 1,8%) reduz para 0,3% após 400 minutos do início da inundação, ou seja, a deformação por colapso com água atinge 99,1% do recalque total e o colapso com esgoto alcança 99,4%. As velocidades dos colapsos dos solos não apresentaram grandes diferenças. As variações ocorridas entre os solos inundados com água e esgoto também podem estar dentro da repetibilidade dos ensaios.

Nos ensaios edométricos duplos, os valores calculados de deformação volumétrica específica mostram solos com alta compressibilidade sob efeito de inundação (entre 17,35 e 25,96%) descrevendo preliminarmente o caráter colapsível dos mesmos. Contudo, o comportamento dos solos, fazendo-se uso do conceito de deformação volumétrica específica, não apresenta rigorosamente a mesma tendência de resultados dos potenciais de colapso calculados para os ensaios edométricos simples.

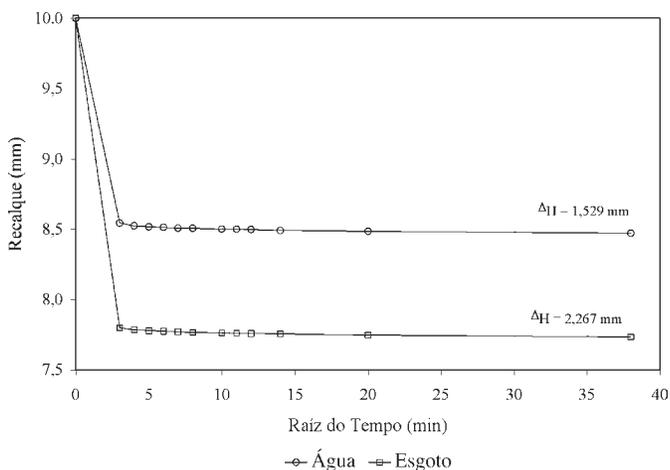


Fig. 17 – Colapso vs raiz do tempo do Solo A a 1 metro de profundidade.

Os potenciais de colapso foram obtidos sob uma tensão previamente escolhida. A escolha da tensão de 200 kPa justificou-se por localizar-se na reta virgem de compressão do solo. No entanto, as deformações volumétricas específicas resultam de variações volumétricas totais dos solos desde a tensão zero até 800 kPa.

Com isto, as deformações ocorridas nas outras tensões sob o qual as amostras foram submetidas podem alterar-se modificando os resultados finais quando comparados os dois tipos de ensaios com os critérios escolhidos para avaliação do colapso.

4 – CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e as discussões efetuadas é possível concluir que:

1. O solo natural indica a presença predominante de alumínio mais hidrogênio, de cálcio e de magnésio, enquanto sódio e potássio apresentam-se com teores mais baixos. Estas características são típicas de solos laterizados que passaram por intenso processo de lixiviação, o que possibilita a acidificação do solo e a formação de uma estrutura floculada.
2. Na área estudada, os parâmetros pH, massa específica e viscosidade do esgoto têm valores muito próximos aos da água. O comportamento tensão de cisalhamento vs taxa de deformação do esgoto também é similar ao da água. No entanto, a tensão superficial da água é $7,42 \cdot 10^{-2}$ N/m e do esgoto é $5,23 \cdot 10^{-2}$ N/m. A redução da tensão superficial do esgoto pode estar associada à quantidade de sabões e detergentes dissolvidos.
3. Por intermédio da microscopia, verificou-se que a estrutura dos solos é formada por partículas grandes apresentando-se circundadas por partículas de argila e silte em estado floculado. A granulometria existente nestes solos é distinta daquela que se encontra com o uso de defloculantes, pois a fração fina ocupa a posição de partículas maiores na escala granulométrica.
4. Mediante os ensaios edométricos simples observou-se que as diferenças entre os potenciais de colapso gerados a partir da inundação do Solo A com água e esgoto doméstico são significativamente maiores na camada mais superficial, decrescendo com a profundidade. A causa deste fenômeno pode ser atribuída à acidez do solo, principalmente nas camadas

menos profundas, que ao ser inundado com esgoto (um líquido que contém sódio) provoca um colapso maior e mais rápido devido a deflocação dos solos finos.

5. Os Solos A e B apresentam perfis de alteração diferentes, podendo condicionar quimicamente a distribuição dos cátions principais e por consequência causar alteração na magnitude do colapso, já que o esgoto doméstico induz maiores recalques nos solos mais lixiviados, ou seja, mais susceptíveis a infiltração de água (Solo A).
6. As velocidades dos colapsos promovidos pela água e pelo esgoto são diferentes. O solo inundado com esgoto doméstico apresentou 97,1% do colapso total após 9 minutos da inundação, enquanto o solo inundado com água apresentou 95,3%. Este resultado representa diferença significativa, apesar de indicar uma velocidade maior do colapso provocado pela inundação com o esgoto. As variações ocorridas entre os solos inundados com água e esgoto também podem estar dentro da repetibilidade dos ensaios.
7. Constatou-se, com a realização de ensaios edométricos duplos, que os solos apresentam alta compressibilidade sob efeito de inundação (em todos os casos com deformações volumétricas específicas acima de 17%) descrevendo preliminarmente o caráter colapsível dos solos.
8. A análise do comportamento dos solos, fazendo uso do conceito de deformação volumétrica específica, não apresenta rigorosamente a mesma tendência das definições que envolvem os potenciais de colapso calculados para os ensaios edométricos simples. Os potenciais de colapso foram obtidos sob uma tensão de 200 kPa, enquanto, as deformações volumétricas específicas resultaram de variações volumétricas totais dos solos inundados.
9. A similaridade entre a água e o esgoto pressupõe que a diferença entre os colapsos analisados na mesma profundidade pode estar sendo governada pelos cátions presentes no fluido. O esgoto, no entanto, pode produzir diversos efeitos no mecanismo do colapso dependendo da composição química dos solos.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio fornecido, na forma de financiamento à pesquisa (Processo 1999/12.551-2) e bolsa de mestrado (Processo 2000/14.406-9), que possibilitaram a realização desta pesquisa.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agnelli, N. (1997), “Comportamento de um solo colapsível inundado com líquidos de diferentes composições químicas”, *Tese de doutoramento em geotecnia*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Collares, A. C. Z. B. (1997), “A Influência de características químicas do fluido de saturação no colapso dos solos”, *Tese de Mestrado em Geotecnia*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Dudley, J. H. (1970), “Review of Collapsing Soils”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*. 96 (SM3), 925-947.
- Lollo, J. A. (1996), “O Uso da Técnica de Avaliação do Terreno no Processo de Elaboração do Mapeamento Geotécnico: sistematização e aplicação na Quadrícula de Campinas”, *Tese de doutoramento em geotecnia*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

- Lollo, J. A. (1998), “Caracterização geotécnica da área de expansão urbana de Ilha Solteira (SP) com o uso de formas de relevo”. *Actas do III Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia*, Florianópolis, (em CDROM).
- Lutenegger, A. J. e Saber, R. T. (1988). “Determination of Collapse Potential of Soils”. *Geotechnical Testing Journal*. ASTM, 11, n. 3, 173-178.
- Rodrigues, R. A. (2000). “Carta de solos colapsíveis para a área urbana do Município de Ilha Solteira (SP)” *Relatório final de iniciação científica*, FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo).
- von Sperling, M. (1996). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.