

VARIAÇÕES DA COMPRESSIBILIDADE E DO POTENCIAL DE COLAPSO DE UM SOLO PERANTE DIFERENTES LÍQUIDOS DE INUNDAÇÃO

Eduarda Queiroz Motta¹ e Silvio Romero de Melo Ferreira²

Resumo: A colapsibilidade e a compressibilidade dos solos são influenciadas pela percolação de fluidos e conseqüentemente, pela interação química entre o líquido e o solo. A variação de volume do solo devido a percolação de fluido tem acarretado vários danos em obras de Engenharia, como trincas, fissuras ou mesmo rupturas de casas, edifícios, reservatórios e canais, depressões em pavimentos rodoviários e aterros. O comportamento de colapso de um solo compactado, proveniente do município de Petrolândia-PE, foi analisado por meio de ensaios edométricos simples e duplos com inundações com diferentes líquidos, esgoto bruto, soluções preparadas a base de água sanitária, de detergente, de sabão em pó, óleo de soja, chorume e água destilada, a qual serviu como parâmetro comparativo entre os líquidos utilizados. Apresenta-se, também, uma Análise de Componentes Principais (PCA) da influência de diferentes parâmetros no colapso deste solo. As amostras foram compactadas estaticamente na umidade natural e peso específico aparente seco de campo. O colapso foi induzido através da inundações do solo, sob tensão, com os líquidos de inundações. Concluiu-se que a colapsibilidade e a compressibilidade do solo dependem da interação física e química do solo com o líquido de inundações, sendo resultado de um conjunto de fatores, como molhabilidade, pH e teor de sais do líquido. A análise utilizando PCA permite uma visualização eficiente e mais rápida dos parâmetros influentes.

Palavras-chave: Solos colapsíveis. Solos não saturados. Contaminação do solo. Interação solo-líquido. Análise de Componentes Principais.

1 Introdução

O colapso de um solo pode ser gerado pela mudança do estado tensional (tensão vertical, estrutura e sucção) e pela interação físico-química entre o percolante e o solo. Muitos casos de colapso têm sido associados a vazamentos oriundos das redes de esgotos e de abastecimento de água, ou a vazamentos de sistema de armazenamento de combustíveis e efluentes químicos. No entanto, o colapso dos solos, geralmente, é estudado, considerando-se, apenas, a sua inundações por água. Na literatura, encontram-se poucos relatos da influência do líquido, nas características colapsíveis dos solos.

Na convenção anual da "American Society of Civil Engineers" em 1976, na Filadélfia, definiu-se solo colapsível ou metaestável como "O solo não saturado (por água) que experimenta um rearranjo radical de partículas e grande redução de volume quando inundado com ou sem carga adicional." como descrevem Clemente e Finbarr (1981). O fenômeno do colapso tem

acarretado vários danos em obras de engenharia como trincas, fissuras ou mesmo rupturas de casas, edifícios, reservatórios e canais, depressões em pavimentos rodoviários e aterros, e formação de superfície de escorregamento de taludes.

Muitos solos colapsíveis apresentam em suas estruturas grãos de areias revestidos por partículas de argila, óxidos de ferro e de alumínio, carbonatos, entre outros, que constituem elementos cimentantes entre partículas não argilosas dos solos macroporosos. A dispersão da argila de um solo é governada por um conjunto de propriedades que incluem taxa de absorção de sódio, porcentagem de sódio trocável, pH, tipo de solo e concentração de sais dissolvidos na água (INGLÉS; AITCHISON, 1969). A velocidade com que os vínculos de cimentação perdem sua resistência depende do fluido que percola o solo e da solubilidade do cimento (REGINATTO; FERRERO, 1973, CARVALHO et al., 1987).

O colapso do solo está intrinsecamente relacionado com a sua estrutura, seu grau de estabilidade, e as

¹ E-mail: eduardaqmotta@gmail.com

² E-mail: sr.mf@hotmail.com

interações físico-químicas entre o líquido e o solo. As propriedades do líquido, em contato com o solo (tensão superficial, condutividade elétrica e pH, entre outros), influenciam sua velocidade de penetração e sua interação com o solo, e, conseqüentemente, nos potenciais de colapso.

Nos efeitos físicos, tem-se a expulsão forçada do ar aprisionado nos poros do solo, por causa do umedecimento e da quebra de cimentações, por ação mecânica de sobrecargas e/ou ação do peso próprio. Já nos efeitos químicos, tem-se a dissolução de cimentações, por ação química do líquido que interage com o solo. E nos efeitos físico-químicos, tem-se a interação do líquido com a superfície dos minerais do solo, ocorrendo a hidratação da superfície com a ação de uma força repulsiva, devido ao potencial de solvatação ou afinidade de interação e ao desenvolvimento da dupla camada elétrica, e à conseqüente mudança de volume (MARIZ, 1993).

A cidade de Petrolândia, situada na região semi-árida do Estado de Pernambuco, realocada por ocasião do enchimento do reservatório da barragem de Itaparica, apresentou, em grande parte de suas edificações, sérios problemas de fissuras e trincas, ocorrendo, em alguns casos, a completa demolição da edificação, devido ao colapso do solo. Alguns desses problemas foram, também, causados por vazamentos, oriundos das redes de esgotos e por águas servidas, lançadas ao solo.

Acidentes com derramamento de gasolina, contaminando o solo e o lençol freático ocorrem com certa frequência no país. Uma argila da Formação Barreiras foi percolada por diversos fluidos, água, gasolina, solução aquosa saturada de cloreto de sódio a fim de testar seu desempenho como barreira de contenção. Nobre e Ferreira (2007) verificaram que a argila utilizada tem relevante aplicação na contenção de hidrocarbonetos principalmente de gasolina, podendo ser utilizada como barreira de contenção. Ferreira (2008) apresenta várias soluções de engenharia para evitar ou minimizar os efeitos da variação de volume em solos colapsíveis devido a percolação de fluidos. Feitosa et al. (2010) analisaram a interação físico-química e microestrutural de um solo colapsível melhorado com lodo de esgoto tratado. Os autores concluíram que há um teor de lodo adequado, que adicionado ao solo compactado, estabiliza a estrutura do

solo reduzindo significativamente a variação de volume do solo quando inundado.

O esgoto bruto, as águas servidas e o chorume, quando em contato com o solo, têm, além do potencial de contaminação, influência no comportamento da deformação em função da tensão, através da interação solo-líquido, em especial quando o solo apresenta estrutura metaestável.

Assim, este trabalho teve por objetivo analisar a variação da compressibilidade e do potencial de colapso de solo, através da percolação de diferentes líquidos contaminantes.

2 Material e métodos

2.1 Solo

O solo estudado é uma areia do Município de Petrolândia, Pernambuco, localizado a 520 km da cidade do Recife. Segundo Ferreira (1995), o perfil do solo apresenta-se pouco evoluído, seja pela grande resistência ao intemperismo do material de origem (arenito), seja pelo tempo de exposição (Quaternário) ou devido ao clima da região (árido com chuvas escassas e irregulares) que promove um intemperismo lento ou muito lento.

O solo é, essencialmente, quartzoso (98%), com textura arenosa ($> 890 \text{ g kg}^{-1}$ de areia) e fração argila $< 80 \text{ g kg}^{-1}$, profundo, com espessura de 5,5 m, onde são identificados dois horizontes, o horizonte A, de espessura 0,10 m, e o horizonte C, com 5,40 m, não foi caracterizado o horizonte B. O solo tem capacidade de troca catiônica baixa, é distrófico (pouca fertilidade e sem reservas nutrientes) e no horizonte C o solo é álico. O solo se enquadra na classe pedológica do Neossolo Quartzarônico com Horizonte A, fraco, textura arenosa, fase caatinga hiperxerófila e relevo plano. Os argilo minerais encontrados na fração argila do solo são caulinita e interstratificação irregulares de mica, montmorilonita e clorita-vermiculita, FERREIRA (1995).

Os ensaios foram realizados, com amostras amolgadas, obtidas em profundidades de 1,0 a 2,2 m. Sua caracterização física foi realizada de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas através das seguintes NBR, Granulometria (ABNT, 1984a), Limites de Liqueidez (ABNT, 1984b), Limite de Plasticidade (ABNT, 1984c), Massa

Específica dos Grãos (ABNT, 1984d) e Ensaio de Compactação (ABNT, 1986).

Para a preparação das amostras, determinou-se a umidade higroscópica da amostra seca ao ar, e em seguida, adicionou-se água, de modo que a umidade final alcançasse 3,5% (umidade natural na profundidade de 1,5 m). A amostra foi colocada em um saco plástico e levada à câmara úmida para a equalização da umidade. Com a amostra de solo na umidade desejada, foi calculado o volume de solo necessário para, uma vez realizada a compactação, se chegasse a corpos de prova com peso específico seco de campo (γ_d) igual a $16,50 \text{ kN m}^{-3}$ e umidade natural (w_c) de 3,5%.

A compactação foi realizada, estaticamente, numa prensa de compressão, com capacidade de 10 t e velocidade $0,008 \text{ mm s}^{-1}$. O volume de solo, calculado previamente, era colocado no anel que por sua vez era encaixado no molde de compactação. A forma do molde garantia que o solo não fosse compactado além do necessário, devido ao sistema de segurança no topo, onde existe um contato do pistão, com o topo do molde, impedindo que o pistão compactasse o solo, além do desejado.

A moldagem das amostras (controle de umidade, molde de compactação, controle das massas dos corpos de prova e técnica de compactação estática) resultou em corpos de prova, com reprodutividade das condições esperadas, apresentando índices físicos, com pequena variação de valores, em relação aos desejados ($\gamma_d = 16,50 \text{ kN m}^{-3}$ e $w_c = 3,5\%$).

A caracterização química do solo, antes e após a percolação, nos ensaios edométricos, foi realizada conforme a metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solos (EMBRAPA, 1997). Foram determinados os valores do pH (potencial Hidrogeniônico), da condutividade elétrica no extrato de saturação (CE), das bases - Sódio (Na^+), Potássio (K^+), Cálcio (Ca^{2+}) e Magnésio (Mg^{2+}) e dos ácidos Alumínio (Al^{3+}), e Hidrogênio (H^+). Com base nos resultados da análise química do solo, foram calculados, de acordo com o sistema de classificação de solos da Embrapa (1999), a Soma das Bases (S – Equação 1), a Capacidade de Troca Catiônica (CTC ou T – Equação 2), o Grau de Saturação por Bases (V – Equação 3), a Saturação por Alumínio (m – Equação 4), a Saturação por Sódio (Equação 5), a Retenção de Cátions (RC –

Equação 6) e a Atividade da Fração Argila (Tr – Equação 7),

$$S = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \quad (1)$$

$$\text{CTC} = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+ \quad (2)$$

$$V = 100 \frac{S}{T} \quad (3)$$

$$m = \frac{100\text{Al}^{3+}}{S + \text{Al}^{3+}} \quad (4)$$

$$\text{Satur. por Sódio} = 100 \frac{\text{Na}^+}{T} \quad (5)$$

$$\text{RC} = 100 \frac{S + \text{Al}^{3+}}{\text{argila}(\%)} \quad (6)$$

$$\text{Tr} = 100 \frac{\text{CTC}}{\text{argila}(\%)} \quad (7)$$

Onde:

- S é a soma das bases de sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+});
- CTC ou T é a capacidade de troca de cátions;
- V é o grau de saturação por bases;
- m é a saturação por alumínio;
- Satur. por sódio é a saturação por sódio
- RC é a retenção de cátions;
- Tr é a capacidade de troca de cátions da argila.

2.2 Ensaio edométricos

Foram realizados ensaios edométricos convencionais, simples e duplos, utilizando prensas tipo Bishop e células edométricas do tipo anel fixo. As tensões verticais foram aplicadas, de forma incremental ($\Delta\sigma/\sigma = 1$). Nos ensaios edométricos simples, os corpos de prova foram inundados, nas tensões de 10, 40, 160, 320 e 640 kPa. Os ensaios foram realizados em triplicata. O tempo de duração de cada estágio de tensão era tal que a deformação entre dois intervalos de tempo consecutivos, seguindo uma progressão geométrica de razão dois, fosse inferior a 5% da deformação total do solo, ocorrida até o tempo anterior. Nos ensaios edométricos duplos, foram experimentadas duas condições de carregamento, uma com

a umidade natural (constante), e a outra com o corpo de prova, previamente, inundado. Os valores dos Potenciais de Colapso (CP), obtidos por meio dos ensaios edométricos simples e duplos, foram calculados, utilizando-se as equações (8) e (9), respectivamente.

$$CP(\%) = \frac{\Delta H}{H_i} \times 100\% \quad (8)$$

$$CP(\%) = \frac{\Delta \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_{v(nat)}} \times 100 \quad (9)$$

onde:

- CP é o potencial de colapso;
- ΔH é a variação da altura do corpo de prova, devido à inundação;
- H_i é a altura do corpo de prova, antes da inundação;
- $\Delta \varepsilon_v = \varepsilon_{v(nat)} - \varepsilon_{v(inund)}$, $\varepsilon_{v(nat)}$ é a deformação volumétrica específica do solo, carregado na umidade natural;
- $\varepsilon_{v(inund)}$ é a deformação volumétrica específica do solo, carregado, previamente, inundado.

2.3 Líquidos

Diferentes líquidos de inundação foram utilizados nos ensaios edométricos, água destilada, chorume, esgoto bruto, óleo de soja e soluções (preparadas com concentração 1:120) a base de água sanitária, detergente líquido e sabão em pó.

A tensão superficial dos líquidos foi determinada com tensiômetro Sigma 70, com software integrado, da KSV Instruments. O pH dos líquidos foi determinado, através de um medidor de pH, para soluções aquosas, da marca Analyser, exceto para o óleo, que foi estimado pelo método das fitas de determinação de pH, das marcas Merck e Acilit. A condutividade elétrica foi determinada com condutivímetro, de acordo com metodologia do "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater" (APHA, 1995).

2.4 Análise de Componentes Principais – PCA

A Análise de Componente Principais (PCA) é utilizada em casos nos quais há correlação entre muitas variáveis

analisadas simultaneamente e tem por finalidade básica a redução de dados a partir de combinações lineares das variáveis originais. A PCA é um método de projeção que ajuda a visualização da informação contida em uma tabela de dados (SHARAF, ILLMAN; KOWALSKI, 1986; MASSART; VANDEGINSTE; BUYDENS, 1997).

A determinação das PCs (do inglês, Principal Components) envolve duas etapas, a translação dos dados para a origem e a rotação deles em torno da origem. Seja a matriz X do tipo n x m, no qual n corresponde aos objetos (amostras) e m representa as variáveis (propriedades) dos objetos. Antes da extração das PCs, geralmente, é utilizado um algoritmo para pré-processamento dos dados, sendo os procedimentos mais comuns, a centralização dos dados, em sua média (translação), e o autoescalamento. Já no autoescalamento, os dados são centrados, na média, e divididos por seus respectivos desvios padrão, o que faz com que, depois da transformação, cada variável fique com variância unitária. Como variância é sinônimo de informação, todas as variáveis autoescaladas têm a mesma quantidade de informação.

Se as variáveis são autoescaladas, então os eixos das PCs são os autovetores da matriz de correlação, com o primeiro autovetor correspondendo ao maior autovalor. Os eixos das PCs são conhecidos, também, como variáveis latentes. As direções dessas variáveis são especificadas por vetores p (pesos), que são os autovetores da matriz de correlação. As projeções da matriz de dados, autoescalados sobre esses vetores, são os vetores dos escores t, cujos elementos são as coordenadas dos objetos, nos eixos PC. Todos os cálculos foram realizados com o uso do software Statistica 6.0.

Em uma PCA, os principais resultados depois do pré-processamento da matriz de dados e a extração das PCs, estão listados, a seguir, juntamente, com os seus respectivos significados.

- i. variância - diz quanta informação é modelada por cada PC. De fato, a importância de uma componente principal é expressa em termos de variância, que pode ser expressa de dois modos: a) variância explicada - é a variância, contida na PC considerada, b) variância residual - revela quanta informação, ainda,

- permanece, no conjunto de dados, após a retirada, da informação representada pelas componentes incluídas no modelo;
- ii. pesos (“loadings”) - descrevem a estrutura de dados, em termos de correlação entre variáveis. O peso de cada variável em uma PC reflete o quanto essa variável contribui para a PC. Em termos geométricos, o peso é o cosseno do ângulo entre a variável e a PC considerada; um pequeno ângulo indica um alto peso, portanto uma alta correlação entre a variável e a PC;
 - iii. escores (“scores”) - descrevem a estrutura de dados, em termos de padrões de amostras e, em geral, mostram as diferenças ou semelhanças entre as amostras. Cada amostra tem um escore em cada PC, refletindo sua localização ao longo da PC (as coordenadas da amostra na PC).

Neste trabalho a análise das componentes principais foi dividida em duas partes, na primeira se utilizaram as propriedades dos líquidos de inundação e

os potenciais de colapso para compor as matrizes e, na segunda, as alterações químicas do solo provocadas pela inundação com os líquidos de inundação.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização física e química do solo

Na caracterização física do solo, a análise granulométrica da Areia Amarelo-Avermelhada de Petrolândia-PE, com e sem o uso do defloculante, indica um solo constituído, predominantemente, de areia com granulometria muito uniforme e mal graduada (Tabela 1). O valor do peso específico dos grãos é de $26,4 \text{ kN m}^{-3}$. O solo é não líquido e não plástico, se enquadrando no grupo SM, areia siltosa, na classificação Unificada. O valor do peso específico aparente seco máximo, obtido na energia do Proctor Normal, é de $19,25 \text{ kN m}^{-3}$, na umidade ótima de 8,85%, com grau de saturação de 62,77% (em água).

Tabela 1 - Composição granulométrica do solo

Ensaio	Composição Granulométrica (%)			
	Cascalho 4,8 mm a 7,6 cm	Areia 0,05 mm a 4,8 mm	Silte 0,005 mm a 0,05 mm	Argila inferior a 0,005mm
com defloculante	1	87	3	9
sem defloculante	1	97	1	1

Os valores médios dos resultados da caracterização química do solo obtidos em ensaios com o solo natural e após inundação

com os diferentes líquidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização química do solo antes e após inundação

SOLO	pH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	S	CTC	RC	Tr	V	Satur. m por sódio	
	H ₂ O	μS cm ⁻¹	-----cmol _c kg ⁻¹ -----						-----%-----						
Solo natural	4,19	133	0,02	0,15	0,72	2,50	0,60	2,13	3,39	6,12	44,34	68,01	55,40	15,03	0,36
Água Dest.	4,42	77	0,15	0,18	0,72	1,25	0,60	1,89	2,29	4,78	32,14	53,14	47,94	20,74	3,05
Água Sanit.	4,64	95	0,50	0,23	0,68	2,30	0,60	1,88	3,71	6,19	47,86	68,75	59,92	13,93	8,01
Chorume	6,83	438	1,04	0,44	0,64	1,40	2,00	1,52	3,51	7,03	61,26	78,15	49,95	36,28	14,74
Detergente	4,47	61	0,09	0,14	0,24	1,50	0,40	1,60	1,98	3,98	26,41	44,18	49,70	16,83	2,36
Esgoto Bruto	4,50	301	0,70	0,15	0,56	1,60	0,40	1,62	3,01	5,03	37,89	55,89	59,84	11,73	14,00
Óleo de Soja	3,64	79	0,02	0,11	0,24	1,00	2,00	10,35	1,37	13,72	37,49	152,49	10,01	59,28	0,16
Sabão em Pó	6,83	526	2,68	0,17	0,36	1,30	2,00	1,15	4,51	7,66	72,32	85,09	58,87	30,73	34,96

pH é o potencial hidrogênioônico; CE é a condutividade elétrica; Na⁺ é o cátion sódio; K⁺ é o cátion de potássio; Ca²⁺ é o cátion cálcio; Mg²⁺ é o cátion magnésio; Al³⁺ é o cátion alumínio; H⁺ é o cátion hidrogênio; S é a soma das bases; CTC ou T é a capacidade de troca de cátions; RC é a retenção de cátions; Tr é a capacidade de troca de cátions da argila; V é o grau de saturação por bases; m é a saturação por alumínio.

O solo natural apresenta grau de saturação por bases ligeiramente superior a 50%, que determina seu caráter eutrófico, caracterizando o solo como rico em nutrientes, estando inserido na classificação do novo sistema (EMBRAPA, 1999) nos mesoeutrófico ($75\% \leq V < 50\%$). O percentual de saturação por alumínio ($m < 50\%$) confere ao solo o caráter não álico; e a retenção de cátions ($RC > 1,5\text{cmolc/kg}$), o caráter não ácrico. A capacidade de troca catiônica do solo natural é baixa, mas a atividade da fração argila é alta ($Tr \geq 27\text{cmolc/kg}$). O percentual de saturação por sódio é baixo.

A Tabela 3 apresenta um resumo das interpretações dos cálculos analíticos pedológicos do solo antes e após inundação, onde podem-se observar alterações significativas:

- nos valores do pH que passaram de ácido para, praticamente, neutros após inundação com chorume e com solução a base de sabão em pó;
- na Condutividade Elétrica no Extrato de Saturação que passou de baixa para salino, após inundação com chorume e solução a base de sabão em pó;
- no grau de saturação por bases que passou de eutrófico para distrófico, após inundação com água destilada, chorume, solução a base de detergente líquido e óleo de soja;
- na saturação por alumínio que passou de não álico para álico, após inundação com óleo de soja;
- na saturação por sódio que passou de baixo percentual para caráter solódico, após inundação, com solução a base de água sanitária, chorume e esgoto bruto e para caráter sódico, após inundação, com solução a base de sabão em pó.

Tabela 3 – Resumo das interpretações dos cálculos analíticos pedológicos do solo

Análise Química	Solo Natural	Solo após inundação com:						
		Água dest.	Água sanit.	Chorume	Detergente	Esgoto bruto	Óleo de soja	Sabão em pó
pH	ácido	ácido	ácido	levemente ácido*	ácido	ácido	ácido	levemente ácido*
C.E.	baixo	baixo	baixo	salino*	baixo	baixo	baixo	salino*
V	mesoeutrófico	mesodistrófico*	mesoeutrófico	mesodistrófico*	mesodistrófico*	mesoeutrófico	hipodistrófico*	mesoeutrófico
m	não álico	não álico	não álico	não álico	não álico	não álico	álico*	não álico
RC	não ácrico	não ácrico	não ácrico	não ácrico	não ácrico	não ácrico	ácrico	não ácrico
CTC	baixo	baixo	baixo	baixo	baixo	baixo	baixo	baixo
Tr	Ta	Ta	Ta	Ta	Ta	Ta	Ta	Ta
$100 \frac{Na^+}{T}$	baixo	baixo	solódico*	solódico*	baixo	solódico*	baixo	sódico*

* mudanças em relação ao solo natural; Ta atividade alta.

3.2 Caracterização dos Líquidos de Inundação

As propriedades físicas e químicas dos líquidos utilizados para inundação dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 4. Foram utilizados água destilada, chorume, esgoto bruto e alguns componentes das

águas servidas isolados. As soluções a base de água sanitária, detergente líquido e sabão em pó, foram preparadas, em laboratório, com concentração 1:120, e o óleo de soja que foi utilizado puro.

Tabela 4 – Caracterização dos líquidos de inundação

Líquidos de Inundação	Peso específico (kN m^{-3})	Tensão superficial (mN m^{-2})	pH	Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
Água dest.	9,82	69,94	6,2	20
Água sanit.	9,83	67,16	10,1	810
Chorume	10,00	57,57	8,0	15680
Detergente	9,82	29,36	6,8	440
Esgoto bruto	9,83	36,38	6,6	6120
Óleo de soja	9,00	31,53	4,5	20
Sabão em pó	9,88	27,12	10,4	9250

3.3 Caracterização da Compressibilidade e Colapsibilidade

A compressibilidade do solo compactado é pequena. Nos ensaios edométricos duplos, a variação da deformação volumétrica específica (ϵ_v), com a tensão vertical de consolidação do solo compactado e umidade constante, foi de 4,85% (Figura 1). A deformação volumétrica específica do solo (ϵ_v), inundado com água destilada, foi de 10,5%, no fim do carregamento, uma compressibilidade de 2,17 vezes a do solo natural, referente a um potencial de colapso de 6%.

As maiores deformações volumétricas foram 12,1 e 11,3%, referentes aos potenciais de colapso 7,7 e 6,8%, verificados com o solo inundado com os líquidos de pH alcalino, as soluções a base de água

sanitária e a base de sabão em pó, respectivamente. As demais deformações se apresentaram próximas à do solo inundado com água destilada, para os líquidos de pH próximos ao neutro; enquanto o óleo de soja, de pH ácido, praticamente não gerou colapso.

Nos ensaios edométricos simples, a inundação do solo, com água destilada, sob tensão de 640 kPa, provocou um potencial de colapso de 4,8%, enquanto os maiores valores de potencial de colapso foram de 6,2 e 5,7%, verificados, após a inundação do solo, com chorume e esgoto bruto, respectivamente. A Figura 2 apresenta a variação do potencial de colapso, com a tensão vertical de consolidação do solo, inundado com diferentes líquidos.

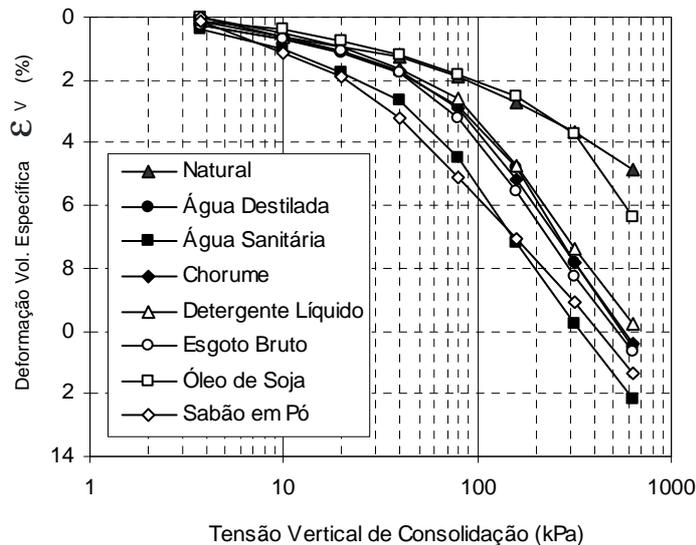


Figura 1 - Deformação volumétrica específica do solo, carregado, previamente, inundado (ϵ_v) versus Tensão Vertical de Consolidação (σ_v) - ensaios edométricos duplos.

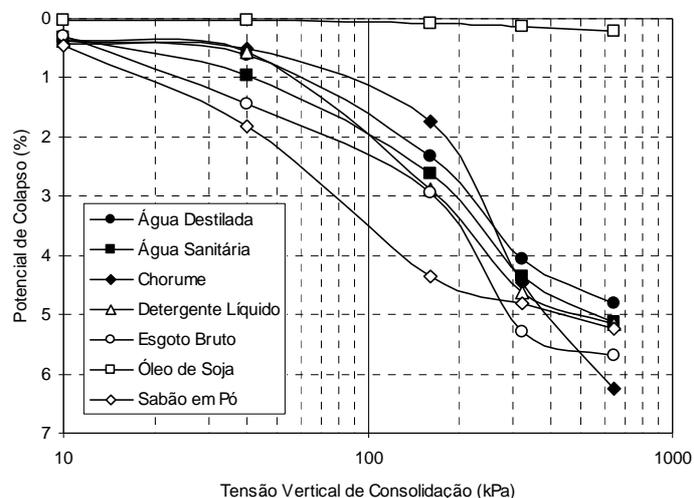


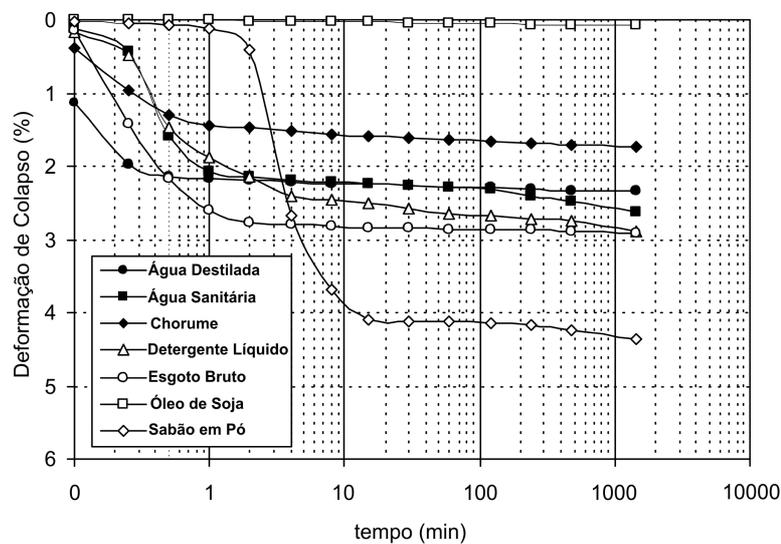
Figura 2 - Potencial de colapso (CP) versus Tensão Vertical de Consolidação (σ_v) – ensaios edométricos simples.

3.4 Influência das propriedades dos líquidos

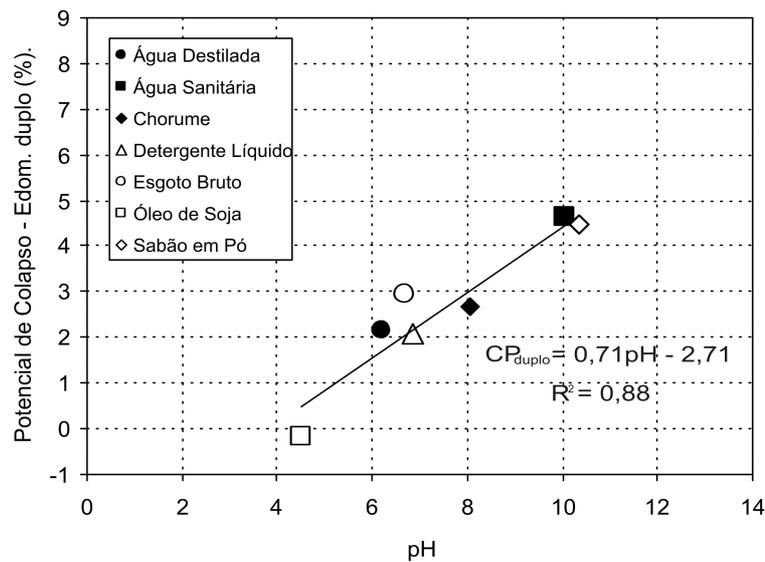
A influência da tensão superficial dos líquidos, utilizados para inundação do solo, foi analisada, durante a inundação, nos ensaios edométricos simples. As deformações dos solos, inundados com líquidos com menores tensões superficiais levaram mais tempo para estabilizar (Figura 3a).

O pH dos líquidos utilizados para inundação foi correlacionado com os potenciais de colapso do solo, na tensão de 160 kPa, como mostrado na Figura 3b. Observa-se a tendência a potenciais de colapso mais altos para líquidos com pH mais alcalinos.

A condutividade elétrica dos líquidos, utilizados para inundação, influencia na mobilidade dos íons no solo. O solo apresentou potenciais de colapso mais altos, quando inundado com líquidos de maior condutividade.



a)



b)

Figura 3 - (a) Deformação de colapso versus tempo com σ_{vi} de 160 kPa, com diferentes líquidos de inundação e (b) variação do potencial de colapso do solo, sob tensão de 160 kPa, com o pH dos líquidos de inundação dos ensaios edométricos duplo.

3.5 Análise de Componentes Principais – PCA

A análise das componentes principais foi dividida em duas partes, na primeira, utilizaram-se as propriedades dos líquidos de inundação e os potenciais de colapso observados nos ensaios edométricos simples para comporem as matrizes e na segunda, as alterações químicas do solo, provocadas pela inundação com os diferentes líquidos.

3.5.1 Análise da matriz - Propriedades dos líquidos e tensões de inundação

Para a observação da influência das propriedades dos diferentes líquidos no colapso do solo utilizando PCA, a matriz de dados formada pelas propriedades físicas e químicas dos líquidos (Tabela 4) e potenciais de colapso do solo (Figura 2) foram utilizados como dados de entrada e o algoritmo adotado para o pré-processamento da matriz destes dados foi o autoescalonamento.

A variância percentual explicada e acumulada (SHARAF et al. 1986) pelas duas primeiras componentes principais é cerca de 80%, chegando a 90% quando se incluiu a terceira componente principal, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Variância percentual da matriz - propriedades dos líquidos e tensões de inundação

Componentes Principais	Explicada (%)	Acumulada (%)
PC1	64,94	64,94
PC2	15,51	80,45
PC3	9,63	90,08

Na Figura 4 são mostrados os escores e os pesos para as duas primeiras componentes principais. O gráfico dos escores (Figura 4b) mostra um contraste ao longo da primeira componente principal (PC1), uma ordenação dos ensaios realizados em função da diferenciação das propriedades dos líquidos utilizados para inundação do solo.

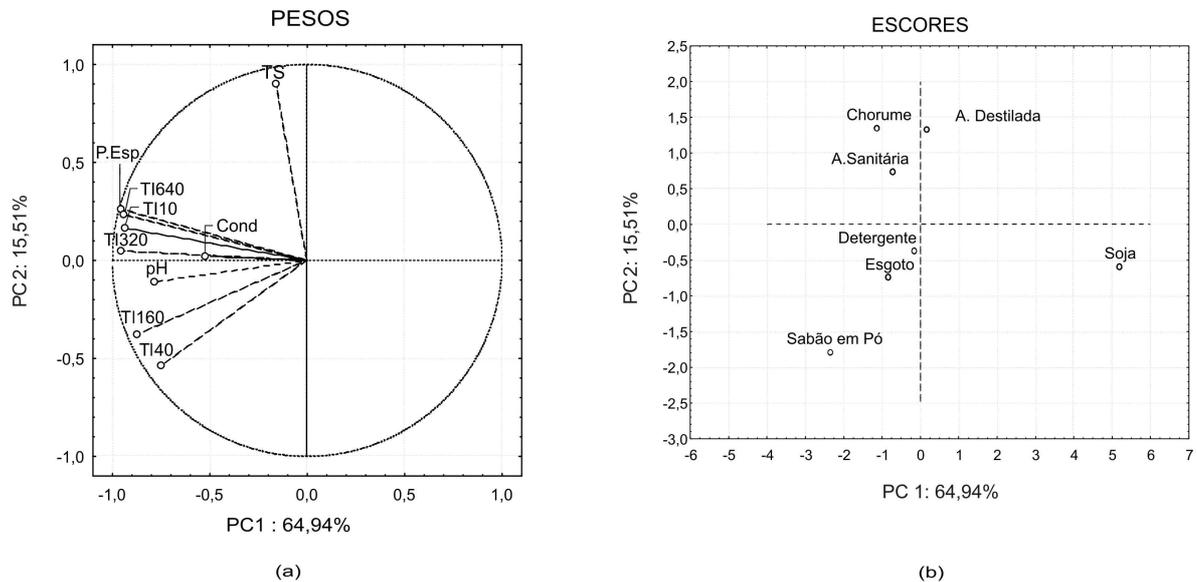


Figura 4 - (a) Pesos e (b) escores para as duas primeiras componentes principais (PCs) da matriz - propriedades dos líquidos e tensões de inundação.

Observa-se na PC1 (Figura 4) que o solo inundado com óleo de soja se diferenciou dos demais, principalmente, do solo inundado com solução a base de sabão em pó, chorume, esgoto bruto e solução a base de água sanitária, em vista aos menores valores de pH e condutividade elétrica. O valor do peso específico, também, se destacou para essas variáveis, mas não foi fator determinante do diferencial do

colapso do solo, porque seus valores são muito próximos. A PC2 mostra claramente um padrão com a formação de dois grupos, em função da tensão superficial, destacando os solos inundados com água destilada, solução a base de água sanitária e chorume, que apresentaram altos valores.

A Figura 4a apresenta uma sobreposição de dados, o que dificulta sua leitura. Para facilitar a visualização e a

interpretação do gráfico dos pesos e dos escores, os resultados obtidos para as duas primeiras componentes foram separados e estão apresentados, com gráficos de barras (Figuras 5 e 6).

Apresenta-se na PC1 (Figura 5a) o gráfico dos pesos que mostra quais variáveis foram responsáveis pelo padrão exibido no gráfico dos escores (Figura 5b). Observa-se que nenhum dos pesos exerce influência no escore do solo inundado com óleo de soja. Ainda, na Figura 5a, pode ser notada uma mesma correlação entre todas as variáveis, destacando-se as tensões de inundação e as propriedades - peso específico, pH e condutividade elétrica. Os escores (Figura 5b) mostram que o solo, inundado com água destilada e com solução a base de detergente líquido, não têm resultado expressivo, o que significa que se

aproximaram da média. O solo inundado com solução a base de sabão em pó, com chorume, com esgoto bruto e com a solução a base de água sanitária tiveram maior destaque, podendo-se constatar na Figura 5a que as propriedades dos líquidos contribuíram com diferentes pesos nos potenciais de colapso.

Na PC2, Figura 6, no gráfico dos escores, pode ser observado o contraste entre o solo inundado com água destilada, chorume e solução a base de água sanitária, quando comparado com o solo inundado com solução a base de sabão em pó, esgoto bruto, óleo de soja e solução a base de detergente líquido. Este contraste é explicado através da tensão superficial, propriedade que mais contribuiu para essa diferenciação, verificada em destaque na Figura 6a.

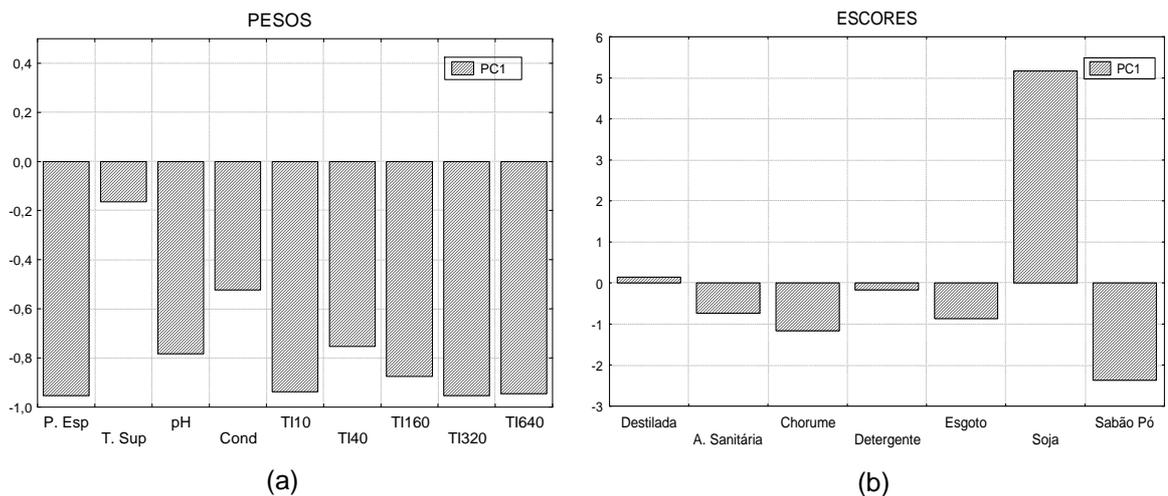


Figura 5 - (a) Pesos e (b) escores para a primeira componente principal (PC1) - propriedades dos líquidos e tensões de inundação.

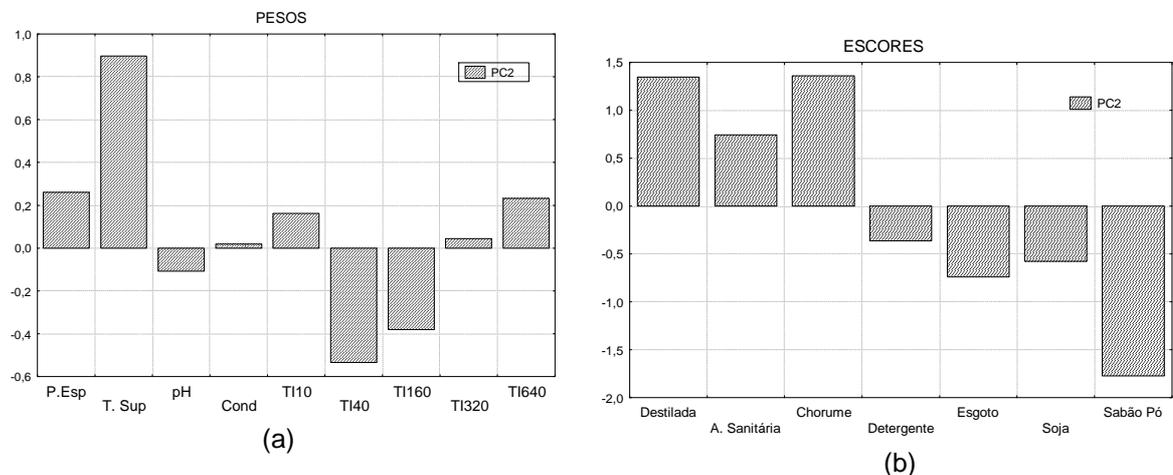


Figura 6 - (a) Pesos e (b) escores para a segunda componente principal (PC2) - propriedades dos líquidos e tensões de inundação.

3.5.2 Análise da matriz – Caracterização química do solo antes e após colapso

Para a observação das alterações na composição química do solo, após o ensaio edométrico simples, com os diferentes líquidos, utilizando PCA, foi efetuada a matriz de dados formada pela caracterização química do solo antes e após inundação, cujos parâmetros e respectivos valores utilizados como dados de entrada são apresentados na Tabela 2. A variância percentual explicada e acumulada é apresentada na Tabela 6.

Na Figura 7, são mostrados os escores e os pesos para as duas primeiras componentes principais. Observa-se, no gráfico dos escores (Figura 7b) ao longo da PC1, uma ordenação dos ensaios, realizados em função da diferenciação produzida na

composição química do solo, na qual o solo inundado com solução a base sabão em pó, óleo de soja e chorume, apresentam uma alteração mais significativa na composição química do solo. A PC2 mostra, claramente, um padrão com a formação de dois grupos, um mais distanciado e outro mais próximo do solo natural, indicando, respectivamente, maior e menor alteração, na sua composição química.

Tabela 6 - Variância da matriz – caracterização química do solo antes e após colapso

Componentes Principais	Explicada (%)	Acumulada (%)
PC1	43,25	43,25
PC2	37,44	80,69
PC3	9,24	89,93

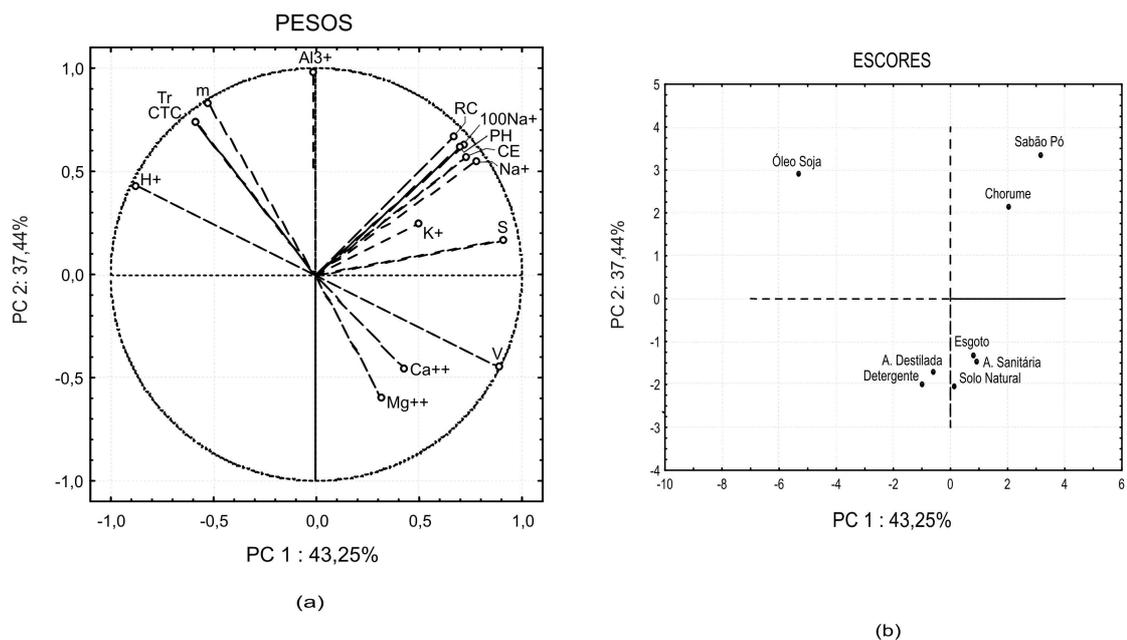


Figura 7 - (a) Pesos e (b) escores para as duas primeiras componentes principais (PCs) da matriz – caracterização química do solo, antes e após colapso.

O gráfico dos pesos mostra quais variáveis foram responsáveis pelo padrão exibido no gráfico dos escores (Figura 8). Na PC1, pode ser observado o contraste entre as variáveis soma das bases (S), grau de saturação por bases (V), pH, saturação por sódio, condutividade elétrica no extrato de saturação (CE) e concentrações de Na^+ e K^+ ;

apresentando maior influência no solo inundado com solução a base sabão em pó e chorume. Enquanto a concentração de H^+ , capacidade de troca catiônica (CTC), atividade da fração argila (TR) e saturação por alumínio (m) apresentaram maior influência no solo inundado com óleo de soja.

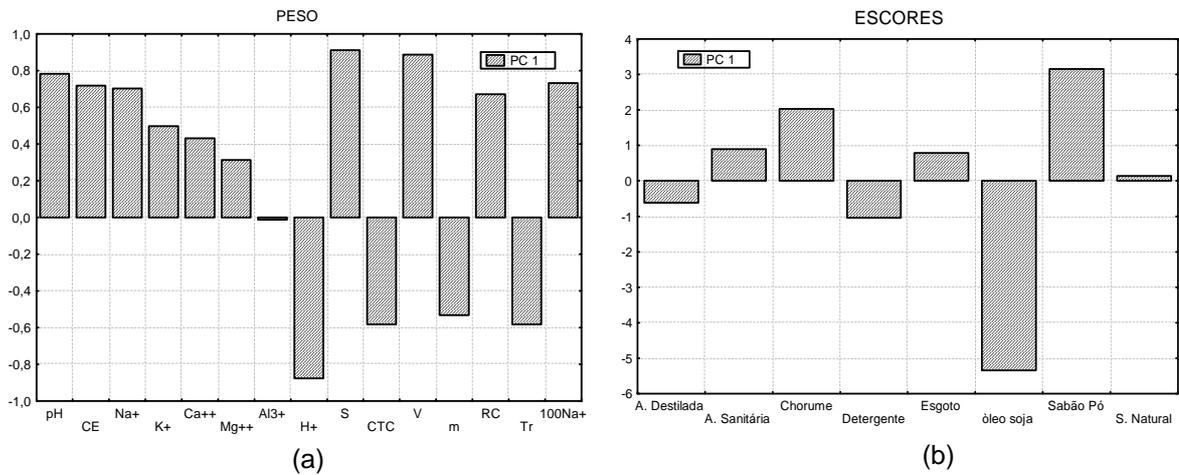


Figura 8 - (a) Pesos e (b) escores para a primeira componente principal (PC1) da matriz - caracterização química do solo antes e após colapso.

Na PC2 (Figura 9) no gráfico dos escores, pode ser observado o contraste na modificação da composição química do solo natural, apresentado pelos diferentes ensaios. O solo, após inundação com a solução a base sabão em pó, com o óleo de

soja e com o chorume apresentou uma maior diferença em relação ao solo natural, onde a concentração de Al^{3+} e a saturação por alumínio (m), foram as que mais contribuíram para essa diferenciação.

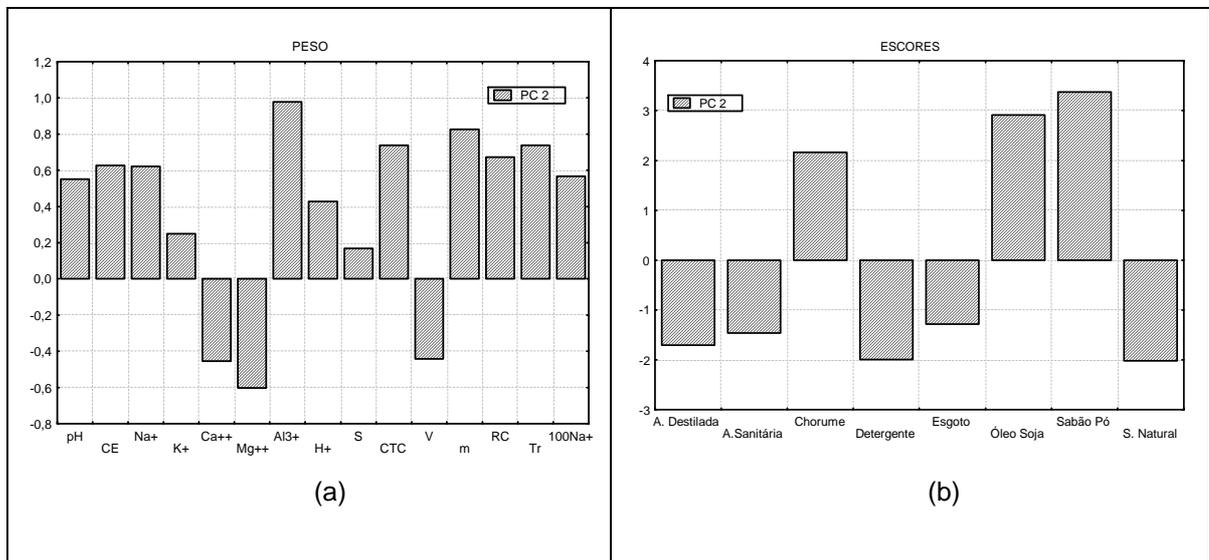


Figura 9 - (a) Pesos e (b) escores para a segundo componente principal (PC2) da matriz - caracterização química do solo antes e após colapso.

4 Conclusões

Os resultados dos ensaios edométricos, para o solo compactado com $\gamma_d = 16,50 \text{ kN m}^{-3}$ e $w_c = 3,50 \%$, indicam que o colapso do solo está associado, não só, ao declínio da sucção, como também, às interações físico-químicas, entre o solo e o

líquido de inundação. Esse fato sugere que a infiltração de diferentes líquidos, por vazamentos acidentais, por rupturas de reservatórios e tubulações, pode provocar colapso do solo maior que os ocasionados, na estação chuvosa.

As propriedades físico-químicas dos líquidos, utilizados para inundação do solo,

mostraram influência na interação com o solo. Quanto menor a tensão superficial do líquido, maior o potencial de molhabilidade do solo. No entanto, a interação solo-líquido ocorre, de forma lenta. Os líquidos de pH alcalino mostram uma tendência a produzirem maiores potenciais de colapso do solo, bem como os líquidos, com maiores condutividades elétricas. Entretanto, deve-se analisar o conjunto de fatores que influenciam, no comportamento colapso do solo e não atribuí-lo, apenas, a um fator isolado.

É importante destacar a necessidade de uma maior interação, entre as disciplinas, na interpretação das informações dos problemas do solo. Pesquisadores e profissionais de áreas, como agronomia, biologia, geologia, química, matemática, estatística e informática, devem manter um intercâmbio permanente, para que seja, sempre, possível uma visão global e

atualizada dos problemas e de suas possíveis soluções.

As soluções de engenharia para a estabilização dos solos colapsíveis estão condicionadas ao tipo de obra, às características do solo, ao custo e ao tempo de execução. No caso específico de impedir ou reduzir, significativamente, a variação da umidade e a interação solo-fluido contaminante, recomenda-se, aqui, diminuir, suficientemente, a infiltração da água e dos fluidos contaminantes utilizando projetos de drenagem adequados, controle de vazamentos de condutos de água e esgoto, impermeabilização da área não coberta, manutenção constante da rede de abastecimento de água e esgoto. Além do mais, desenvolver programas de educação ambiental, conscientizando os agentes atuantes para não lançarem águas servidas e fluidos contaminantes, nos solos e nos cursos d'água naturais.

5 Collapse potential variation and compressibility of a compacted soil with different flood liquids

Abstract: *The collapsibility and compressibility of soils are influenced by fluids percolation and consequently by the chemical interaction between liquid and soil. The variation of soil volume due to fluid percolation has caused several damages in engineering constructions, such as cracks, fissures or ruptures of houses, buildings, reservoirs and canals, depressions in road pavements and embankments. The collapse behavior of a compacted soil from Petrolândia - PE due to inundation was analyzed with different percolating liquids, sewage, solutions of bleach, detergent, soap powder, soybean oil, leachate, and distilled water, which served as parameter for comparison among the used liquid. A Principal Component Analysis (PCA) of the influence of different parameters in a collapse of this soil is also presented. Samples were statically compacted with the natural water content and dry density of field, and the collapse was induced by flooding the samples with the different liquids. Results show that collapsibility and compressibility of the soil depend on the physical and chemical interaction between the soil and the flooding liquid, resulting from a combination of factors, such as wettability, pH and electrical conductivity of fluids. The PCA analysis shows the influential parameters quickly and efficiently.*

Key-words: Collapsible soils. Unsaturated soils. Contamination. Soil-liquid interaction. PCA for soil characteristics.

6 Referências

- Granulométrica Conjunta. Rio de Janeiro, 13p. 1984a.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for examination of water and wastewater. 19th ed. USA, AWWA, WEF. 1995.
- ANALION. Aparelhos e Sensores Industria e Comércio. Engenharia de Aplicações. Disponível em: <<http://www.analion.com.br>>. Acesso em: 12 dez. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459. Solo: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 6p, 1984b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7180. Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 3p. 1984c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7181. Solo: Análise
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6508. Solo:

Determinação da Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 8p, 1984d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7182. Solo: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 10p, 1986

CARVALHO, J. C., NUNES, P. M., BERBERIAM, D. FERREIRA, E. S. Influencia del pH del líquido de saturación en la colapsabilidad. In: **Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. 8.** Actas..., Cartagena, Colombia: v. 2, p. 1-8. 1987.

CLEMENCE, S. P., FINBARR, A. O. Design considerations for collapsible soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division.** ASCE, v. 107, nº GT3, March, p. 305-317, 1981.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 412p. 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro. Centro Nacional de Pesquisas de solos, 1997.

FEITOSA, M. C. A.; OLIVEIRA, J. T. R.; FERREIRA, S. R. M. Uso de lodo de esgoto para melhoramento de solo colapsível. In: **XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Gramado. ABMS, v. 1. p. 1-9. 2010.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à Inundação.**1995., 379p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 1995.

FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil In: **VI Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados**, Salvador. EDUFBA. v.2. p. 593–619, 2008.

INGLES, O. G.; AITCHISON G. D. Soil-water disequilibrium as a cause of subsidence in natural

soils and Earth Embankments. In: **International Symposium on Land Subsidence Aih. Proceedings...**, Tokio, nº 89, v. II, 342 - 353. 1969.

MARIZ, D. F. **Um estudo físico químico mecânico sobre o colapso de solos Residuais Sesquioxídicos micro-agregados do Planalto Central.** 168p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 1993.

MASSART, D. L.; VANDEGINSTE, B. G .M.; BUYDENS, L. M. C. Handbook of Chemometrics and Qualimetrics, Amsterdam, Elsevier.The Netherlands, 1997.

NOBRE, E. M. G.; FERREIRA, S. R. M.. Uso de argila compactada como barreira de contenção para a gasolina e outros contaminantes. In: **VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos**, Recife. ABMS, 2007.

REGINATTO, A. R.; FERRERO, J. C. Collapse Potential of Soils and Soil-Water Chemistry. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 8. Proceedings...** Moscow, v. 2.2, pp. 177-183. 1973.

SHARAF, M. A.; ILLMAN, D. L.; KOWALSKI, B. Chemometrics. John Willey & Sons. New York, 1986.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo suporte financeiro no desenvolvimento da pesquisa, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES - e ao professor José Edson Gomes de Souza, do Departamento de Química da UNICAP.