

COMPORTAMENTO DE CAMADAS DE CONFINAMENTO SUBMETIDAS AO CONTATO COM REJEITOS DE PIRITA

Behavior of liners submitted to pyritic wastes contact

Alexandre Knop*

Rodrigo Caberlon Cruz**

Karla Salvagni Heineck***

Nilo Cesar Consoli****

RESUMO – Esta pesquisa visa analisar o comportamento compressivo de camadas de confinamento de solo compactado submetidas à percolação de águas ácidas, por meio de um equipamento de coluna desenvolvido nesta pesquisa, adaptado a partir de um equipamento edométrico padrão. As concentrações de ácido sulfúrico nas soluções aquosas estudadas foram de 0, 2, 6 e 10% e foram percoladas nas amostras antes dos ensaios de compressão, com gradientes hidráulicos de 10 e 20. Quanto maior a concentração de ácido no percolato, maior foi o recalque. A variação na altura das amostras foi maior nas amostras percoladas sob gradiente hidráulico 20, comparando-se aquelas permeadas com gradiente hidráulico 10.

SYNOPSIS – This research aims to analyze the compressive behavior of compacted soil liners submitted to the percolation of acids waters using a column apparatus developed in this research, adapted from a standard edometric equipment. The concentrations of sulfuric acid in the aqueous solution studied were 0, 2, 6 and 10%, which were percolated through the samples before the compressive tests, under a hydraulic gradient of 10 and 20. The settlements of the samples increased with the increase of acid concentration in the percolate. The variation in the sample height was higher in tests conducted under a gradient of 20, when compared to the testes performed under a gradient of 10.

PALAVRAS CHAVE – Camadas de confinamento, águas ácidas, rejeitos de carvão.

1 – INTRODUÇÃO

No Brasil, os principais problemas oriundos da mineração podem ser englobados em quatro categorias: poluição da água, poluição do ar, poluição sonora e comprometimento do solo.

Quanto à mineração no Brasil, especialmente a do carvão mineral, ainda se fazem necessários estudos para o monitoramento ambiental em bacias carboníferas, embora a problemática da poluição por exploração do carvão já tenha passado pelo seu auge. Com produção de carvão mineral

* Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

** Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

*** Professora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. karla@ppgec.ufrgs.br

**** Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. consoli@ufrgs.br

ainda significativa em determinados pontos do país, em maior escala na área de Criciúma, estado de Santa Catarina, bem como no centro-leste do Rio Grande do Sul, os problemas ambientais de sua exploração estão principalmente relacionados à poluição do solo e hídrica.

Um dos maiores problemas encontrados na mineração de carvão são os rejeitos provenientes desta. Estes rejeitos contêm um composto denominado pirita, de fórmula molecular FeS_2 , composto este que em exposição ao oxigênio e água, forma uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4). A pirita contém cerca de 46,4% de ferro e aproximadamente 53,6% de enxofre.

As drenagens ácidas são provenientes dos rejeitos contendo sulfetos, em forma de pirita, que ao ficarem expostos à água e ao ar, oxidam-se gerando acidez. Este passivo ambiental até hoje causa danos aos recursos hídricos da região (Farias, 2002).

As jazidas existentes no Rio Grande do Sul apresentam altos teores de matéria mineral não combustível associados ao carvão. Durante o beneficiamento, 30 a 60% do material minerado é refugado, resultando na produção de grandes volumes de rejeitos, constituídos basicamente por materiais carbonosos e minerais (pirita e argilo-minerais) sem valor comercial, que são depositados em áreas próximas ao local de mineração. Na Figura 1 é possível observar a formação de percolados ácidos no entorno dos depósitos de rejeitos piritosos.



Fig. 1 – Percolado de rejeitos de pirita

A necessidade de recuperação dos depósitos está associada ao potencial de acidificação dos rejeitos carboníferos (Caberlon, 2004). A presença de ácido sulfúrico promove a solubilização dos metais e dissolução dos minerais presentes no rejeito; em períodos de intensa precipitação pluviométrica, as águas que entram em contato com estes rejeitos adquirem características ácidas aumentando assim a concentração de metais dissolvidos, comprometendo a qualidade do solo e da água das camadas adjacentes.

Atualmente, está sendo proposto pelos órgãos ambientais o tratamento correto ou simplesmente um armazenamento permanente para os rejeitos da extração de carvão. Uma das formas para tal é a deposição em aterros industriais, com camadas de confinamento de fundo e de cobertura, a fim de se evitar que o percolado entre em contato com as camadas subjacentes ao aterro e que as águas das chuvas não venham a aumentar o volume de percolado, ou mesmo não venham a ser fonte de água para as reações de formação de ácido sulfúrico na pirita, juntamente ao oxigênio disponível no ar.

As camadas de impermeabilização de fundo de aterros mais tradicionalmente empregados são os de argila compactada. A razão principal para utilização deste tipo de camada de confinamento é

a baixa condutividade hidráulica aliada ao baixo custo de execução e abundância de material, muitas vezes solo do próprio local.

As argilas compactadas podem ser utilizadas individualmente ou em conjunto com geossintéticos em barreiras hidráulicas e sistemas de cobertura de aterros. Para o caso das barreiras hidráulicas de fundo, sugere-se que a camada de argila deve possuir uma condutividade hidráulica inferior a 1×10^{-9} m/s (EPA, 1992; ASTM, 1991). Para os sistemas de cobertura, existem distinções na condutividade hidráulica máxima requerida em função do tipo de resíduo.

No caso da formação de percolado com características altamente ácidas, faz-se necessário um estudo prévio do comportamento hidráulico e compressivo da camada de impermeabilização. O contaminante pode alterar as características físico-químicas da camada, alterando a condutividade hidráulica desta, fato este que pode comprometer a eficácia da impermeabilização. Para que a condutividade hidráulica seja baixa, utilizam-se solos altamente plásticos, que possuem características de contração e expansão com mudanças de umidade. A presença de ácido sulfúrico no percolado pode vir a alterar estas características, resultando em camadas de confinamento sem eficiência (Daniel & Koerner, 1995; Benson et al, 1999).

Até então não se tem conhecimento de estudos quanto à variação da compressibilidade de camadas de confinamento compactadas mediante contato direto com agentes agressivos quimicamente, de baixo pH. Assim sendo, esta pesquisa apresenta um relato inédito e de destacada importância sobre o assunto. Espera-se contribuir no aperfeiçoamento das técnicas de projeto e execução de camadas de confinamento em contato direto com percolados agressivos através da investigação da variação da compressibilidade destas camadas de solo compactado, atacadas quimicamente por águas ácidas, a médios e altos níveis de tensão. Da mesma forma, serão investigadas possíveis alterações dos Limites de Atterberg das amostras ensaiadas, após o término dos ensaios de compressibilidade.

2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO DE COMPRESSÃO EDOMÉTRICA

2.1 – Programa Experimental

O programa experimental, realizado com o objetivo de caracterizar e simular o comportamento de uma camada de confinamento exposta à contaminação por ácido sulfúrico, contemplou ensaios de compressão unidimensional em amostras de solo compactado, percoladas com água contaminada com ácido sulfúrico em concentrações da ordem de 0, 2, 6 e 10%, sob gradientes hidráulicos de 10 e 20 e carregadas até 4000 kPa. Ensaios de Limites de Atterberg foram realizados para as mesmas amostras ensaiadas, após o término do ensaio de carregamento.

2.2 – Materiais

2.2.1 – Solo

O solo utilizado como base dos experimentos é um solo residual de arenito, da formação Botucatu (SRAB), proveniente da região metropolitana de Porto Alegre, no sul do Brasil. Muitas pesquisas utilizando este solo foram realizadas nos últimos anos neste programa de pós-graduação (Núñez, 1991; Thomé, 1999; Heineck, 2002; Knop, 2003; Caberlon, 2004), contribuindo para a caracterização do mesmo.

O solo possui Limite de Liquidez (LL) de 23,5%, Limite de Plasticidade (LP) de (13%) e densidade real dos grãos (G_s) de 2,65. A curva granulométrica do material é apresentada na Figura 2. Curvas de compactação do material na energia Proctor normal são apresentadas na Figura 3. Os parâmetros utilizados para a confecção dos corpos de prova foram obtidos da curva realizada por Caberlon (2004), onde se verifica uma umidade ótima ($w_{ót}$) de 14,2% e o peso específico seco (γ_d) de 17,6 kN/m³.

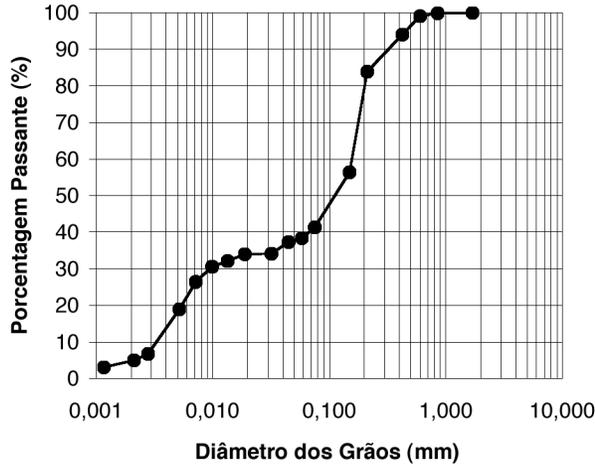


Fig. 2 – Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu

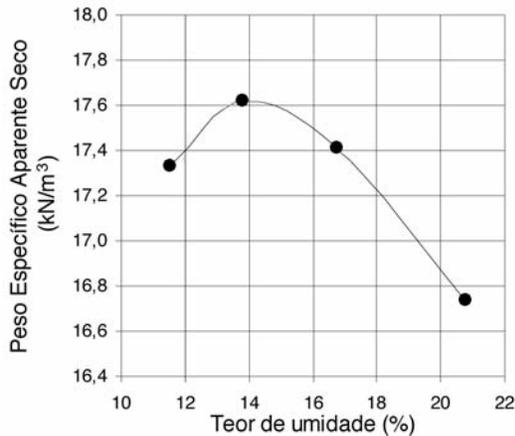


Fig. 3 – Curva de compactação do solo residual de arenito Botucatu

Verifica-se que o material é composto por 5% de argila (< 0,002mm), 36,4% de silte (0,002 a 0,075mm) e 58,6% de areia, sendo que desta porcentagem 52,6% é de areia fina (0,074 a 0,42mm) e somente 6,0% é de areia média (0,042-2,0mm). Assim sendo, o solo pode ser geotecnicamente classificado como sendo uma areia silto-argilosa, e como SM (areia siltosa), segundo a classificação unificada (ASTM D 2487, 1993).

Este solo tem condutividade hidráulica da ordem de 10⁻⁸m/s, e tem sido utilizado em sistemas de contenção onde o órgão ambiental aceita valores de condutividade hidráulica superior a 10⁻⁹ m/s, muitas vezes por se tratar do único material disponível na região. Ainda, pode ser empregado com adição de argilas expansivas no intuito de diminuir a condutividade hidráulica em também em ca-

madras de confinamento de cobertura. Por este motivo, enfatiza-se a necessidade de estudar as condições do solo posteriormente à exposição do mesmo por percolados ácidos.

2.2.2 – Ácido Sulfúrico

O ácido sulfúrico foi empregado por ser o resultado da reação dos rejeitos de pirita com o oxigênio e a água das chuvas. Utilizou-se o H_2SO_4 industrial 95-98% para as simulações em laboratório, em concentrações da ordem de 0, 2, 6 e 10%. Tais concentrações foram utilizadas por serem representativas das condições encontradas nos rejeitos de pirita e por englobarem uma variação que simula desde percolados fracos até os mais fortes encontrados na natureza, com pH no intervalo de 0,5 a 1.

O ácido sulfúrico caracteriza-se por ser um líquido denso, oleoso, incolor, inodoro, altamente corrosivo, apresentando perigo extremo em caso de contato. Além disto, o ácido é não inflamável, sendo miscível em todas proporções com H_2O , com grande desprendimento de calor.

2.2.3 – Água

Foi empregada água destilada na diluição das soluções concentradas de ácido sulfúrico, nas concentrações determinadas pelo programa experimental.

2.3 – Métodos

2.3.1 – Ensaio de Compressão Edométrica

As amostras utilizadas nos ensaios de compressão edométrica foram confeccionadas a partir de parâmetros determinados em ensaio de compactação (peso específico aparente seco máximo e umidade ótima) com energia Proctor Normal, apresentado na Figura 3. A moldagem das amostras deu-se através de compactação estática em 3 camadas, diretamente dentro do cilindro onde os corpos de prova eram ensaiados, resultando em amostras de 7cm de diâmetro por 10cm de altura. O procedimento de ensaio era iniciado com a fase de percolação com água, que durava aproximadamente 4 dias. Esta fase foi realizada com o objetivo de saturar a amostra com água, antes de percolar o fluido ácido e era considerada encerrada quando a condutividade elétrica do percolado atingia a mesma condutividade elétrica da água e quando a velocidade de fluxo tornava-se constante. O monitoramento da condutividade elétrica do percolado foi realizado para verificar o momento em que os íons livres presentes no solo deixavam de influenciar na condutividade elétrica do líquido percolado, ou seja, quando a condutividade elétrica do percolado ficava igual a zero. Este monitoramento era realizado para evitar resultados errôneos de condutividade elétrica do percolado quando da introdução de ácido nas amostras.

Na segunda fase do ensaio o líquido percolante era modificado, de água destilada para soluções ácidas, em concentrações de ácido sulfúrico pré-estipuladas no programa experimental. O percolado era monitorado a pequenos intervalos de tempo, através da condutividade elétrica, pH e massa percolada. A fase com percolação de solução ácida tinha duração conforme a concentração de ácido e durava, em média, 5 dias.

Os gradientes hidráulicos foram impostos às amostras através de dois reservatórios de nível constante, com diferenças de altura entre a amostra e o nível dentro do reservatório adequadas para a aplicação de gradientes iguais a 10 e 20, e foram escolhidos como objetivo de simular camadas de confinamento expostas a condições extremas de gradientes hidráulicos.

A terceira fase do ensaio, após o equilíbrio entre as concentrações de entrada e saída do corpo de prova, foi realizada com objetivo de analisar o comportamento compressivo do material após percolado com a solução ácida. Nesta fase era realizado carregamento das amostras, mantendo-se a percolação. Os estágios de carregamento dos corpos de prova iniciavam com 50kPa, 100, 200, 400, 625, 850, 1072, 1350, 1765, 2176, 2592, 3007, 3905 e por fim, 4130kPa, com o objetivo de analisar o comportamento do material a baixos e altos níveis de carregamento. Estes incrementos foram aplicados em função dos pesos disponíveis para o equipamento no laboratório. O descarregamento também foi investigado com o intuito de estabelecer se a porção elástica observada era afetada pela percolação por ácido. Como resultado do ensaio, obteve-se o comportamento carga versus recalque das amostras percoladas sob diferentes gradientes hidráulicos.

2.3.2 – Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg foram determinados com base nas normas NBR 6459 (ABNT, 1984-a) – Determinação do limite de liquidez e NBR 7180 (ABNT, 1984-b) – Determinação do limite de plasticidade, visando detectar possíveis alterações nos mesmos devido à percolação das águas ácidas, nas diferentes concentrações e gradientes.

2.4 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão Edométrica

Foi desenvolvida nesta pesquisa uma câmara edométrica de formato cilíndrico, mostrada na Figura 4, que permite a aplicação de cargas verticais a um corpo de prova submetido ao fluxo de águas ácidas, em concentrações e gradientes pré-estabelecidos no programa experimental. Esta câmara tem medidas internas de 7cm de diâmetro e 10cm de altura e foi construído em aço inox. Este cilindro é provido de um top cap e uma base, que fornecem sustentação ao conjunto. No top cap, há uma entrada que permite a entrada do líquido percolante, bem como a entrada de um pistão, que transmitirá as cargas ao corpo de prova. Este conjunto foi adaptado em uma prensa de adensamento convencional, formando o chamado ensaio edométrico modificado.

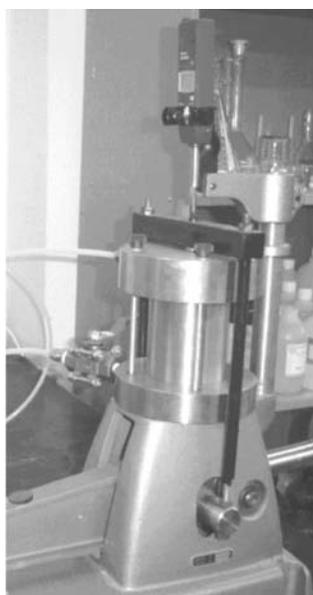


Fig. 4 – Detalhe da célula de compressão edométrica

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 – Comportamento Compressivo das Camadas de Confinamento Estudadas

Nas Figuras 5 a 8 são apresentadas as variações da altura versus tensão vertical em corpos de prova submetidos à percolação de 0, 2, 6 e 10% de ácido sulfúrico, respectivamente, para os gradientes 10 e 20. Nas Figuras 9 e 10 apresenta-se um comparativo da tensão versus altura do corpo de prova para todos os ensaios, com ambos os gradientes utilizados. É possível visualizar que há uma pequena distinção das curvas carga-recalque para o solo submetido às mesmas concentrações de contaminante, porém a gradientes diferentes. Considera-se que um maior gradiente pode ter estimulado a migração de finos para fundo da amostra, aumentando, desta forma, o índice de vazios na face superior da amostra, acarretando um recalque maior para o gradiente mais alto.

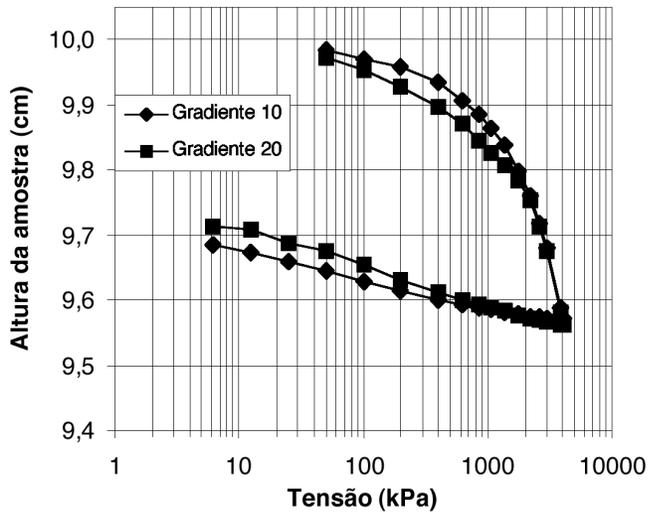


Fig. 5 – Altura do corpo de prova versus tensão, para 0% de ácido sulfúrico no percolado.

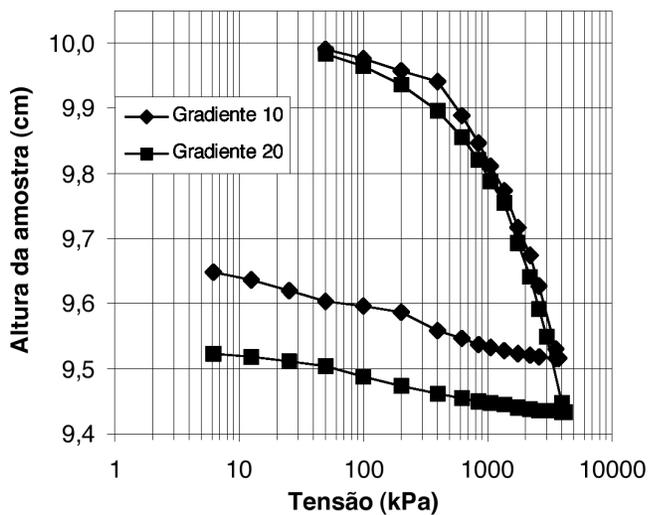


Fig. 6 – Altura do corpo de prova versus tensão, para 2% de ácido sulfúrico no percolado.

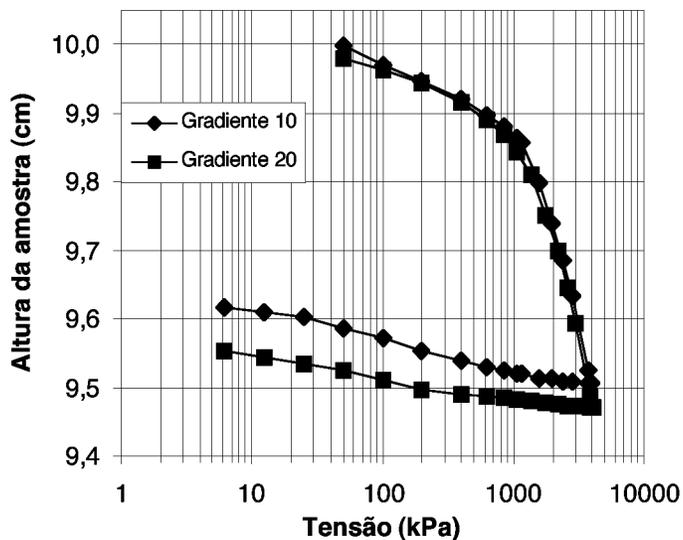


Fig. 7 – Altura do corpo de prova versus tensão, para 6% de ácido sulfúrico no percolado.

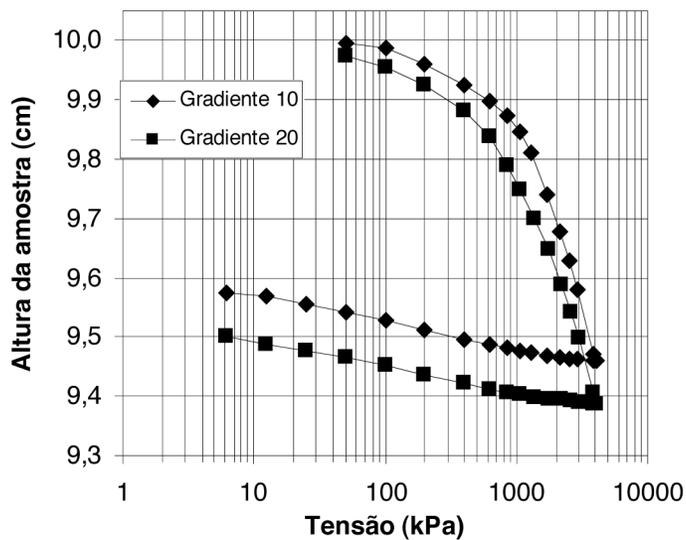


Fig. 8 – Altura do corpo de prova versus tensão, para 10% de ácido sulfúrico no percolado.

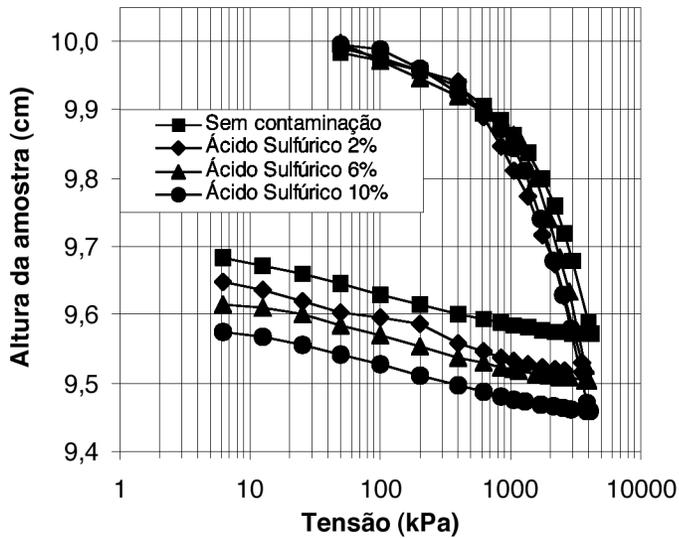


Fig. 9 – Altura do corpo de prova versus tensão, para gradiente = 10.

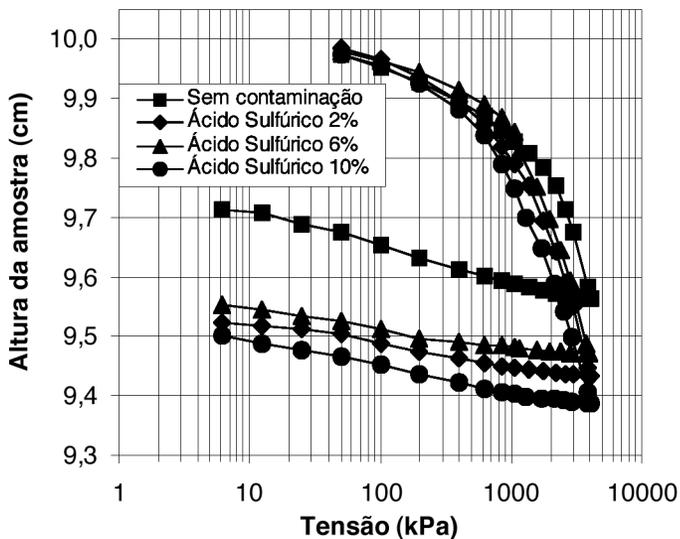


Fig. 10 – Altura do corpo de prova versus tensão, para gradiente = 20.

Observa-se que o comportamento do solo é diretamente afetado pela concentração de ácido sulfúrico no percolado, onde para maiores concentrações do ácido ocorrem maiores níveis de recalques do corpo de prova no carregamento. Tomando um mesmo nível de tensões, como por exemplo, a tensão máxima aplicada aos corpos de prova (na ordem de 4MPa) sob gradiente hidráulico 10 e comparando-se os recalques obtidos com a percolação de água com os recalques do solo percolado com ácido, percebeu-se um aumento de 13% nos recalques da amostra quando percolada com uma solução com 2% de ácido sulfúrico (de 4,28mm para 4,84mm); 15,6% de aumento nos recalques quando percolada com 6% de ácido (de 4,28mm para 4,95mm) e aumento de 26,2% nos

recalques quando percolada com 10% de ácido (de 4,28mm para 5,4mm). Comportamento semelhante pode ser observado para o solo sob gradiente hidráulico 20, porém em maior escala: os recalques do solo percolado com água comparados com os recalques do solo percolado com ácido mostram um aumento de 30% quando percolado com uma solução com 2% de ácido sulfúrico (de 4,37mm para 5,68mm); 21% de aumento nos recalques quando percolado com 6% de ácido (de 4,37mm para 5,29mm) e aumento de 40% nos recalques quando percolado com 10% de ácido (de 4,37mm para 6,12mm).

Na Tabela 1 estão mostrados os parâmetros de compressibilidade do solo percolado com 0, 2, 6 e 10% de ácido sulfúrico, sob gradientes 10 e 20. Observa-se que o índice de compressão (C_c) e o índice de recompressão (C_r) praticamente não são afetados pela presença do ácido no percolado, nem pelo gradiente hidráulico imposto à amostra. O índice que é efetivamente influenciado pela presença do ácido é a tensão de pré adensamento (σ_{vm}), que diminuiu com o acréscimo da concentração de ácido no percolado, fazendo com que as retas virgens de compressão não fiquem sobrepostas. Neste caso, quanto maior a concentração de ácido no percolado, mais rapidamente a reta virgem de compressão é alcançada, principalmente para o gradiente 20. Com relação ao descarregamento, a presença de ácido também não influenciou nos índices de descompressão (C_d) encontrados.

Tabela 1 – Parâmetros de compressibilidade do solo percolado com 0, 2, 6 e 10% de ácido sulfúrico.

GRADIENTE HIDRÁULICO	% ÁCIDO NA SOLUÇÃO	C_c (índice de compressão)	C_r (índice de recompressão)	C_d (índice de descompressão)	σ_{vm} (kPa) (Tensão de pré adensamento)
10	0%	0,1104	0,0070	0,0071	1220 kPa
	2%	0,0848	0,0085	0,0077	1050 kPa
	6%	0,1110	0,0145	0,0073	1130 kPa
	10%	0,1132	0,0171	0,0065	1035 kPa
20	0%	0,1096	0,0152	0,0083	1800 kPa
	2%	0,1089	0,0143	0,0054	1620 kPa
	6%	0,1243	0,0119	0,0042	1000 kPa
	10%	0,1045	0,0115	0,0050	1020 kPa

Portanto, baseando-se nos parâmetros de compressibilidade encontrados, pode-se dizer que quanto maior a concentração de ácido, menor a tensão de pré-adensamento do solo, ou seja, mais rapidamente o solo irá alcançar o estado normalmente adensado, estando suscetível a maiores níveis de deformações.

Desta forma, torna-se evidente a influência da presença do ácido no comportamento compressivo do solo, tanto da sua concentração quanto do gradiente com que este percola pelo liner, atribuindo este comportamento a uma mudança na estrutura da amostra devido à presença do ácido sulfúrico.

3.2 – Limites de Atterberg

Os ensaios de Limites de Atterberg realizados em amostras ensaiadas à compressão mostraram uma discreta variação dos resultados para distintas concentrações de ácido presentes no percolado.

Conforme citado em 2.2.1, o LP do solo residual de arenito Botucatu é 13% e o LL 23,5%. Foram percolados soluções de ácido sulfúrico em meio aquoso em concentrações de 0, 2, 6 e 10%,

e investigadas as variações destes Limites. Os resultados obtidos estão apresentados de forma simplificada na Tabela 2, e apresentados graficamente na Figura 11. É possível visualizar uma variação muito pequena nos LL devido à percolação de solução ácida. A variação máxima obtida para LL foi para 6% de percolação de solução ácida, onde houve uma queda de 24%, de 23,5% para 17,9%.

Tabela 2 – Variação dos Limites de Atterberg.

% de ácido sulfúrico na solução	LL (%)	LP (%)	IP (%)
-	23,5	13	10,5
2%	19,8	10,7	9,2
6%	17,9	10,0	7,9
10%	19	11,2	7,8

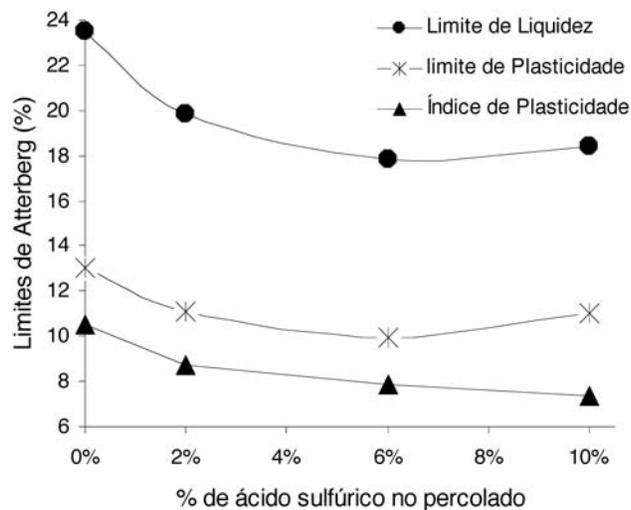


Fig. 11 – Variação dos Limites de Atterberg com a concentração de ácido no percolado.

Observando-se a Tabela 2 e a Figura 11, verifica-se que o LP do solo, da mesma forma que o LL, foi afetado pela percolação do agente químico. O caso em que houve maior variação deste foi quando percolado por uma solução de 6% de ácido, apontando uma queda de aproximadamente 23,5%.

A pequena variabilidade dos resultados sugere que a diminuição dos Limites de Atterberg devido à presença de ácido observada pode estar dentro do limite das incertezas. Entretanto, considera-se que a presença de ácido efetivamente influencia os Limites de Atterberg porque foi observada também uma aparente perda de trabalhabilidade do material conforme aumentava a quantidade de ácido na solução percolante.

4 – CONCLUSÕES

Baseando-se nos ensaios realizados no programa experimental, foi observado para todas as concentrações de ácido no percolado que os recalques foram maiores quando a solução ácida per-

colou com o gradiente mais alto. O aumento no gradiente hidráulico poderia ter estimulado a migração de finos ao fundo da amostra, aumentando o índice de vazios na face superior da mesma, acarretando um recalque maior.

Verificou-se uma variação entre os recalques de corpos de prova submetidos a diferentes concentrações de ácido, percolados sob um mesmo gradiente. Foi observado que uma maior concentração de ácido no percolado faz com que maiores recalques finais sejam observados, com maior distinção entre ambos, principalmente a altas tensões. Havendo uma mudança do comportamento compressível do solo para diferentes concentrações de ácido percolado, presume-se que houve mudanças na estrutura do solo devido à percolação ácida.

A variação dos limites de liquidez e plasticidade foi apenas discreta, podendo estar dentro da variabilidade natural do ensaio. Entretanto, considera-se que a presença de ácido realmente afetou os Limites de Atterberg em função de ter sido observada uma aparente perda de trabalhabilidade do material quando em presença de ácido.

Esta pesquisa, que se encontra em sua fase inicial, demonstra ser de grande importância no projeto e previsão de comportamento de camadas de confinamento submetidos ao contato direto com águas ácidas. O projetista deve considerar os recalques que o liner irá sofrer devido ao contato com o resíduo ácido, e não somente devido à carga de resíduo que este será submetido.

Espera-se contribuir no aperfeiçoamento das técnicas atualmente utilizadas em projeto e execução de camadas de confinamento em contato direto com percolados agressivos quimicamente, através da investigação da variação da compressibilidade unidimensional de camadas de confinamento formadas de solo compactado, atacadas quimicamente por águas ácidas, a médios a altos níveis de tensões.

5 – AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq (Projetos Produtividade em Pesquisa 300832/2004-4 e Edital Universal 471396/2003-6 e 472643/2004-5), ao Projeto PRONEX-FAPERGS (0408410) e a Capes (Projeto ProDoc) pelo apoio financeiro ao grupo de pesquisa.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Norma Técnicas. Solo – Determinação do limite de liquidez: NBR 6459. Rio de Janeiro, 1984-a, 6p.

Associação Brasileira de Norma Técnicas. Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180. Rio de Janeiro, 1984-b, 4p.

ASTM D 1973 (1991) Standard Guide for Design of a Liner System for Containment of Wastes. Annual Book of ASTM Standards 1998, Philadelphia.

ASTM D 2487 (1993). Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: D 2487. Annual Book of ASTM Standards 1998, Philadelphia.

Benson, C. H., Daniel, D. E. & Boutwell, G. P., 1999, Field Performance of Compacted Clay Liners, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, N° 5, pp. 390-403.

- Caberlon, R. C. (2004). Condutividade hidráulica de um solo contaminado encapsulado. Dissertação de Mestrado PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, Brasil. 95p.
- Daniel, D. E.; Koerner, R. M. (1995). Waste Containment Facilities: Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems. New York: ASCE, 354p.
- EPA - U. S. Environmental Protection Agency. (1992). Code of Federal Regulations, Title 40, Chapter I, Part 264.221 – Design and operation requirements. 57 FR 3487, 29/01. Internet. Disponível em: <http://www.access.gpo.gov/ecfr>. Acesso em 10/1/2005.
- Farias, C. E. G. (2002). Mineração e meio ambiente no Brasil. Relatório da CGEE PNUD - contrato 2002/001604. Outubro. Internet, www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf, Acesso em 17/11/2004.
- Heineck, K. S. (2002). Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis. Tese de doutorado - CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 251p.
- Knop, A. (2003). Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos. Dissertação de mestrado – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Núñez, W. P. (1991). Estabilização física e química de um solo residual do arenito Botucatu, visando seu uso em pavimentos. Dissertação de mestrado - CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil. 150p.
- Thomé, A. (1999). Comportamento das fundações rasas apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais. Tese de doutorado. CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 238p.