

# COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE SOLO-BENTONITA E SOLO-CIMENTO-BENTONITA PARA A APLICAÇÃO EM BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE CONTAMINANTES

Behavior of soil-bentonite and soil-cement-bentonite mixes for use in vertical cutoff walls

Karla Salvagni Heineck\*

Lidiane Ibeiro\*\*

Rafael Menna Barreto Azambuja\*\*\*

**RESUMO** – Barreiras verticais de contenção de contaminantes constituem atualmente uma solução rápida e eficaz na solução de problemas geotécnicos ambientais de contenção de contaminações subsuperficiais. Com o objetivo de estudar o comportamento de materiais de preenchimento para estas barreiras, ensaios triaxiais convencionais adensados não drenados (CIU) e ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em misturas de solo-bentonita (SB) e solo-cimento-bentonita (SCB). Foram analisados diferentes fatores água-cimento, teores de umidade e tensões confinantes, assim como três valores distintos de teor de bentonita nas amostras de SCB e dois teores de bentonita para as amostras de SB. A análise global dos resultados permitiu identificar as alterações provocadas no comportamento mecânico e condutividade hidráulica, mediante a variação dos parâmetros citados. Os ensaios CIU indicaram que, para um mesmo teor de bentonita, a diminuição do fator água-cimento ocasionou um aumento nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do material. Para um fator  $a/c=6$ , o aumento do teor de bentonita também ocasionou um aumento nos parâmetros de resistência do material. A condutividade hidráulica das misturas de SB apresentou valores inferiores em relação às misturas de SCB.

**SYNOPSIS** – Vertical cutoff walls are a quick and effective solution in solving geotechnical and environmental problems concerning containment of subsurface contamination. With the objective of studying the behaviour of materials suitable to use as a fill for these barriers, undrained triaxial tests (CIU) and hydraulic conductivity tests were carried out in soil-bentonite (SB) and soil-cement-bentonite (SCB) mixtures. Different water-cement ratios, water contents and confining pressures were analysed, as well as three different bentonite contents for SCB mixes and two for SB mixes. The global analysis of the results allowed identifying changes in mechanical behaviour and hydraulic conductivity due to parameter variation. The results of the CIU tests indicated that for the same bentonite content, decreasing the water/cement ratio resulted in an increase in material strength parameters. For a  $w/c$  ratio of six, increasing the bentonite content also caused an increase in material strength parameters. Results of hydraulic conductivity tests revealed that SCB mixes had higher hydraulic conductivity than SB mixes.

**PALAVRAS CHAVE** – Ensaios triaxiais, barreiras, SCB, condutividade hidráulica.

---

\* Professor Associado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil E-mail: karla@ppgec.ufrgs.br

\*\* Aluna de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil E-mail: lidi249@hotmail.com

\*\*\* Ex-aluno de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

## 1 – INTRODUÇÃO

Desde a década de 40, as *slurry walls*, ou barreiras verticais de contenção, têm sido empregadas com o objetivo de confinar o lençol freático. A partir dos anos 70, essas barreiras começaram a ser aplicadas na geotecnia ambiental, com o propósito do confinamento do lençol freático contaminado. É uma técnica que tem sido largamente utilizada na Europa e nos Estados Unidos, substituindo outros processos construtivos consagrados de barreiras de contenção (paredes diafragma, estacas prancha, etc.) devido, essencialmente, a maior rapidez na construção e ao seu menor custo (Xanthakos, 1979; LaGrega *et al.*, 1994).

As barreiras têm a finalidade de evitar a contaminação do lençol freático ou de áreas específicas através de seu confinamento, de tal forma que impeçam o contato com as plumas de contaminantes encontradas no solo. O método de construção das *slurry walls* consiste basicamente na escavação de um trecho, normalmente com 0,6 a 1,50 m de largura (D'Appolonia, 1980), onde as paredes da escavação são suportadas por uma lama contendo bentonita, que posteriormente é substituída por um material geotécnico compósito, objetivo do presente estudo.

Diversos materiais podem ser utilizados como material de preenchimento do trecho escavado, sendo os mais usuais o solo-bentonita, cimento-bentonita, solo-cimento-bentonita e até mesmo escória-cimento-bentonita (Opdike e Evans, 2005).

O material de preenchimento dessas paredes é sempre uma mistura com bentonita, cuja composição deve ser definida na fase de projeto. Para Xanthakos (1979), a bentonita pode desempenhar diferentes papéis, quando misturada com materiais distintos: em barreiras de solo-bentonita, ela contribui para uma distribuição granulométrica mais extensa do material, enquanto que nas barreiras de cimento-bentonita, ela “suporta” as partículas de cimento, evitando a segregação da lama. Os teores de bentonita usuais variam, podendo chegar até 20%, segundo Ryan e Spaulding (2008).

Por ser um método construtivo bastante difundido, alguns autores estudaram as propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais componentes das barreiras (Evans, 1993, 1994; Jefferis, 2012; Andromalos e Fisher, 2001; D'Appolonia, 1980; Bouazza *et al.*, 1999), porém são escassos os dados de parâmetros publicados na literatura sobre o seu desempenho após a completa execução da obra.

A interação entre o cimento e os argilominerais tem sido estudada a nível microestrutural. Read *et al.* (2001), Chew *et al.* (2004) e Gaucher e Blanc (2006) estudaram a geoquímica e a mineralogia dos argilominerais quando expostos ao cimento. Já o efeito da adição de cimento nas propriedades hidráulicas e mecânicas de argilas foi estudado por Chew *et al.* (2004), Lorenzo e Bergado (2004), Horpibulsuk *et al.* (2005), entre outros.

Propõe-se no presente trabalho a análise do comportamento mecânico e hidráulico de um material compósito constituído de uma matriz de solo residual areno-siltoso, junto com o cimento Portland CP V (ARI) e bentonita sódica, bem como somente solo e bentonita sódica, visando o uso como material de preenchimento de barreiras de contenção de contaminantes do tipo *slurry walls*.

## 2 – METODOLOGIA

### 2.1 – Descrição do programa experimental

O programa experimental foi dividido em três etapas. Na primeira etapa foram realizados ensaios de caracterização dos solos utilizados: solo residual de arenito Botucatu (SRAB) e bentonita. Na segunda etapa, foram definidas as dosagens das misturas de SB e SCB a serem trabalhadas na pesquisa. O estudo do comportamento mecânico e hidráulico dos materiais foi

realizado na terceira etapa do programa experimental, através da realização de ensaios triaxiais convencionais não drenados (CIU), levados a grandes deformações (dentro de uma faixa de 15% a 20%) e avaliação da condutividade hidráulica, durante a realização dos ensaios triaxiais.

## 2.2 – Dosagens

A definição da dosagem dos materiais utilizados nas misturas foi feita baseada em valores publicados na literatura (Xanthakos, 1979; D'Appolonia, 1980; Evans, 1993; Pearlman, 1999; Andromalos e Fisher, 2001, Ryan e Spaulding, 2008) e através de testes realizados. Estas informações estão resumidas no Quadro 1.

**Quadro 1** – Dosagens dos materiais utilizados no programa experimental.

Fator água-cimento	Teor de bentonita (%)	Teor de umidade (%)
Sem cimento	18 e 22	80
2, 4 e 6	6	80, 100, 150 e 200
2, 4 e 6	15 e 18	80

## 2.3 – Materiais

O solo utilizado na pesquisa é uma areia fina siltosa, mal graduada, fracamente plástica. Trata-se de um solo residual (horizonte C), substrato de arenito, pertencente à denominada Formação Botucatu. Verifica-se que o material é composto por 5% de argila (< 0,002 mm), 38,9% de silte (0,002 a 0,074 mm) e 56,1% de areia, sendo que 47,3% é areia fina (0,074 a 0,42 mm) e somente 8,8% areia média (0,042 a 2,0 mm), podendo ser classificado geotecnicamente como uma areia siltosa, segundo a NBR 6502 (1995) e segundo a classificação unificada definida na ASTM D 2487 (1993). Possui um peso específico dos grãos de 26,5 kN/m<sup>3</sup>. Os limites de plasticidade (LP) e de liquidez (LL) obtidos para esse solo foram de 19% e 22%, respectivamente. A bentonita utilizada na matriz de arenito e cimento foi uma bentonita sódica comercial ativada com carbonato de sódio, comercializada na forma pulverizada, classificada como argila, segundo a NBR 6502 (1995) e como CH (argila inorgânica de alta plasticidade), segundo a classificação unificada. Possui um limite de plasticidade de 58%, limite de liquidez de 420% e peso específico dos grãos de 30,9 kN/m<sup>3</sup>.

A Fig. 1 apresenta a curva granulométrica obtida para o solo residual com o uso de defloculante, assim como para a bentonita.

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI). Este tipo de cimento possui a vantagem de atingir altos valores de resistência em baixos períodos de cura, permitindo uma desforma mais rápida. Desta forma, o período de cura definido no programa experimental foi de apenas 7 dias.

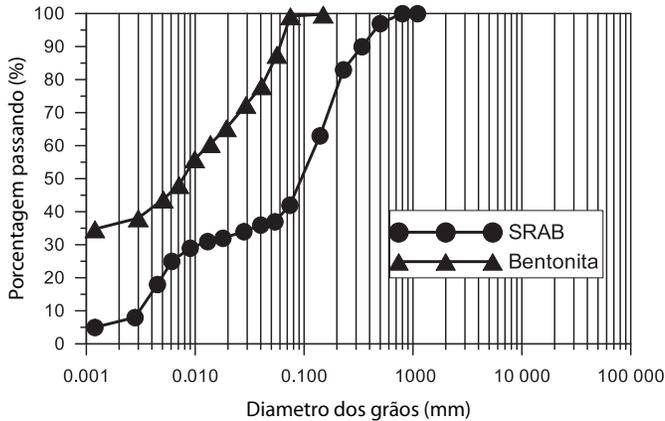


Fig. 1 – Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu (SRAB) e da bentonita (Heineck, 2002).

#### 2.4 – Preparação das amostras e procedimentos de ensaios

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios triaxiais foi realizada em moldes bipartidos de PVC com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Devido aos altos teores de umidade das misturas, os moldes de PVC foram vedados lateralmente e inferiormente através da aplicação de borracha de silicone, com o objetivo de evitar a fuga de água através do molde. Como não foi possível a compactação da amostra em camadas, a mistura dos materiais foi devidamente despejada dentro dos moldes até uma altura de 100 mm, demarcada internamente no molde de PVC.

Os componentes foram adicionados em um recipiente em duas etapas distintas: bentonita e água foram adicionadas e misturadas manualmente até ser obtida a homogeneização, verificada visualmente. Terminada a primeira etapa, solo e cimento foram adicionados e misturados até atingir um aspecto homogêneo. Esta seqüência foi a mais apropriada, pois permitiu que os grumos de bentonita formados em contato com a água fossem facilmente desagregados, propiciando assim uma melhor homogeneização da mistura. Os corpos de prova foram preparados um a um. Durante este processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de umidade por evaporação.

Os procedimentos gerais adotados na preparação e execução dos ensaios triaxiais seguiram basicamente os princípios descritos por Bishop e Henkel (1962), Head (1980) e pelos procedimentos de ensaios já consolidados pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRGS. As deformações axiais foram medidas no interior da câmara triaxial através de dispositivos baseados em sensores de efeito Hall (Clayton e Khatrush, 1986; Clayton *et al.*, 1989), que permitem uma medição acurada das deformações, e também por um transdutor (LVDT) externo. Após a colocação do corpo de prova na câmara triaxial e do ajuste dos sensores de efeito Hall, era iniciada a fase de saturação da amostra. O processo de saturação foi realizado em duas fases: (1) nesta fase a amostra era submetida a uma tensão efetiva de 20 kPa para impedir um fluxo preferencial entre o corpo de prova e a membrana, e posterior percolação de água, da base para o topo do corpo de prova; esta etapa era interrompida quando o volume de água percolado equivalia ao dobro do volume do corpo de prova; (2) aplicação de contra-pressão, onde estágios de incrementos de 50 kPa na tensão confinante e na contra-pressão eram aplicados, sendo a tensão efetiva mantida a um nível ligeiramente superior (20 kPa); quando a poro-pressão monitorada na base do corpo de prova equalizava-se com a contra-pressão aplicada em seu topo, um novo incremento de pressão era aplicado; o processo continuava até se chegar a um valor médio de aproximadamente 430 kPa, para assegurar a dissolução completa das bolhas de ar e a saturação das amostras.

Após a fase de saturação, o ensaio de condutividade hidráulica era realizado, e somente após o término deste a amostra era submetida à tensão confinante na qual o ensaio triaxial seria conduzido, tomando-se o cuidado de esperar o tempo necessário para a amostra adensar.

A garantia de saturação da amostra foi monitorada através da medição do parâmetro B (Skempton, 1954), medida após a aplicação de um incremento de tensão, realizada nos três últimos níveis de tensões possíveis, limitado pela contra-pressão utilizada na fase de cisalhamento.

A fim de determinar as características de resistência e deformabilidade da mistura de SB e SCB, foram realizados ensaios triaxiais convencionais adensados isotropicamente e com ruptura não drenada (CIU), com deformação controlada, com velocidade de deformação de 0,017mm/min. Os ensaios foram realizados a níveis de tensões efetivas variando de 20 a 200 kPa, com diferentes teores de umidade e fatores a/c. Estes ensaios estão resumidos no Quadro 2.

**Quadro 2** – Resumo dos ensaios triaxiais realizados no programa experimental.

<b>Fator água-cimento</b>	<b>Teor de bentonita (%)</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>	<b>Tensão efetiva (kPa)</b>	<b>Total de ensaios</b>
<b>2</b>	6	80	20	1
	15	80	20	1
<b>4</b>	6	80	20	1
	15	80	20	1
	18	80	20	1
	6	100	20	1
	6	150	20	1
	6	200	20	1
<b>6</b>	6	80	20, 60, 100 e 200	4
	15	80	20, 60 e 100	3
	18	80	20, 60 e 100	3
	6	100	20	1
	6	150	20	1
<b>SB</b>	18	80	20, 60 e 100	3
<b>SB</b>	22	80	20	1

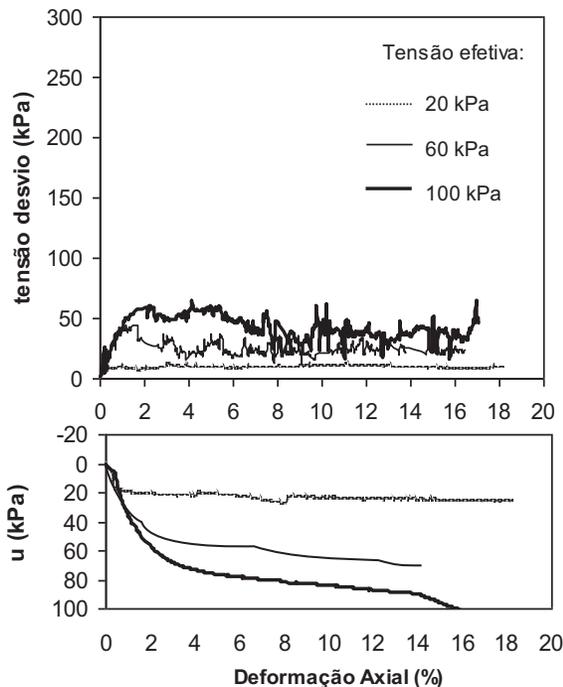
Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados no próprio equipamento triaxial, ao final da fase de saturação e previamente ao adensamento e carregamento dos corpos de prova. Desta forma, a amostra foi ensaiada aproximadamente 48 horas após sua instalação na câmara triaxial, tempo necessário para a fase de percolação e saturação. Todos os ensaios foram executados com uma tensão efetiva de 20 kPa e sob carga hidráulica constante, com um gradiente hidráulico de 25 e teor de umidade de 80%.

### 3 – RESULTADOS

#### 3.1 – Comportamento mecânico de misturas de solo-bentonita (SB)

Para esta etapa do programa experimental foram previstos 4 ensaios triaxiais adensados não drenados em amostras de SB com teor de umidade de 80% e teores de bentonita de 18% e 22%. Não foram realizados ensaios em corpos de prova com teores de bentonita de 6% e 15% devido à falta de consistência das amostras no momento da desmoldagem. As tensões efetivas utilizadas nos ensaios com 18% de bentonita foram de 20, 60 e 100 kPa, a fim de se obter a envoltória de ruptura e os parâmetros de resistência da mistura. Para o teor de 22% de bentonita foi realizado somente um ensaio, para fins de comparação.

A Fig. 2 apresenta os resultados para as amostras com teor de bentonita de 18%. Pode-se observar que esse material possui uma resistência ao cisalhamento sob condição não drenada muito baixa. Com relação às curvas de geração de poro-pressão, verifica-se um aumento sistemático da poro-pressão, indicando que esse material apresenta uma tendência clara de contração durante o processo de cisalhamento sob condição drenada.



**Fig. 2** – Comportamento tensão e variação de poro-pressão vs. deformação axial para misturas de SB com teor de bentonita de 18%.

A Fig. 3 ilustra as mesmas curvas em função do teor de bentonita, para uma tensão efetiva de 20 kPa. Pelo gráfico, pode ser observado que apesar da bentonita ser um material bastante compressível e com uma resistência ao cisalhamento muito baixa, verifica-se que o aumento do teor de bentonita de 18 para 22% não causou uma queda de resistência no compósito. Isto deve estar associado à diminuição do índice de vazios do material, formando uma estrutura mais coesa, e por consequência, resultando no aumento da resistência. Para teores de bentonita mais altos, espera-se que o aumento da quantidade de bentonita diminua a resistência do compósito.

A Fig. 4 mostra a envoltória de resistência de pico e as trajetórias de tensões efetivas dos ensaios triaxiais CIU da mistura de SB com teor de bentonita de 18%. Observa-se na figura que o intercepto coesivo obtido para esse material foi de 4,5 kPa, enquanto que o ângulo de atrito interno de pico resultante foi de 16,6°, valores estes característicos de um material com alto teor de bentonita e umidade.

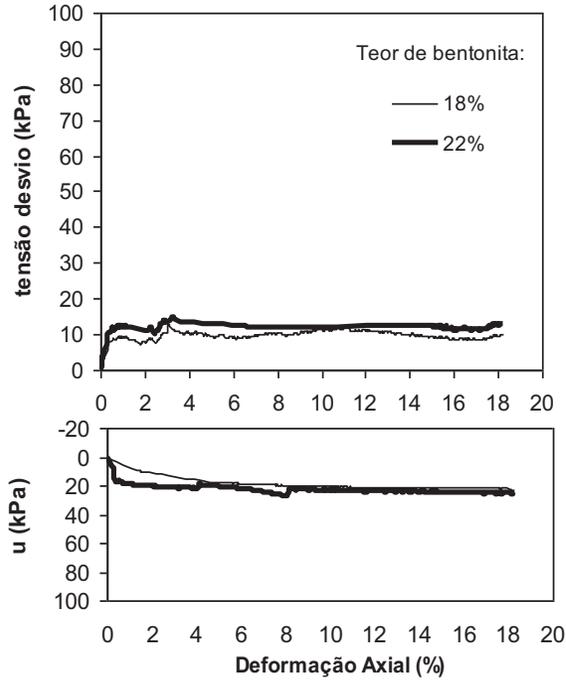


Fig. 3 – Influência do teor de bentonita no comportamento tensão desvio e poro-pressão vs. deformação axial para uma tensão efetiva de 20 kPa.

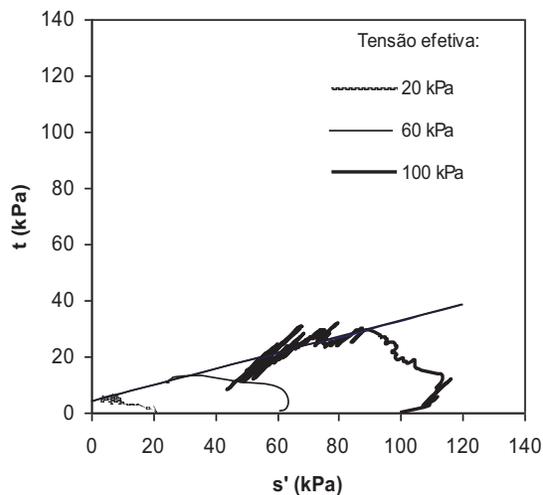


Fig. 4 – Trajetória de tensões de misturas de SB com teor de bentonita de 18%.

### 3.2 – Comportamento mecânico de misturas de solo-cimento-bentonita (SCB)

#### 3.2.1 – Comportamento mecânico - 6% de bentonita

As curvas tensão desvio vs. deformação axial e de variação de poro-pressão vs. deformação axial obtidas nos ensaios triaxiais não drenados são apresentadas nas Figs. 5 e 6. A Fig. 5 apresenta os gráficos em função do teor de umidade, para uma mesma tensão efetiva de 20 kPa e 6% de bentonita. A Fig. 6 mostra a influência do fator água-cimento, para uma tensão efetiva de 20kPa e um teor de umidade de 80%.

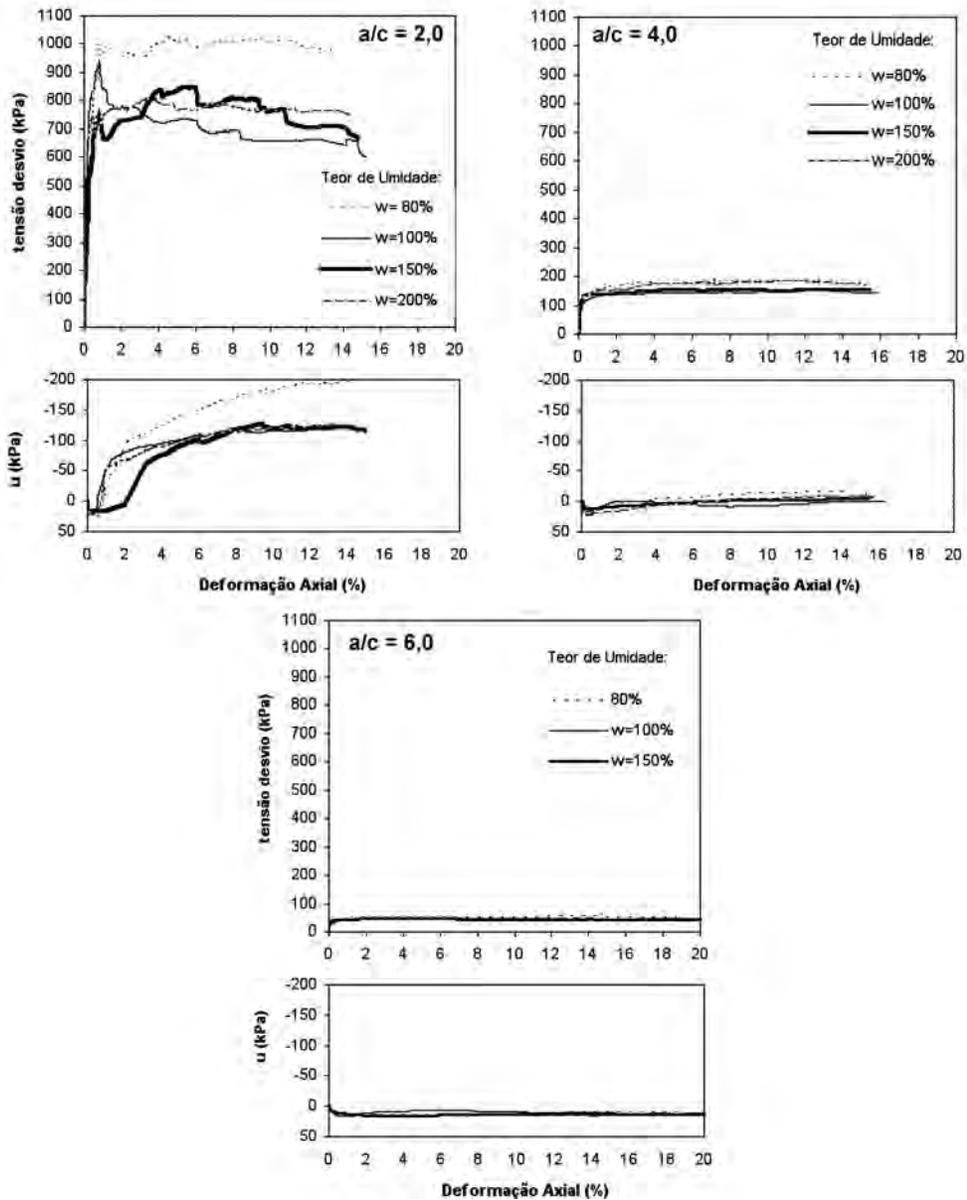
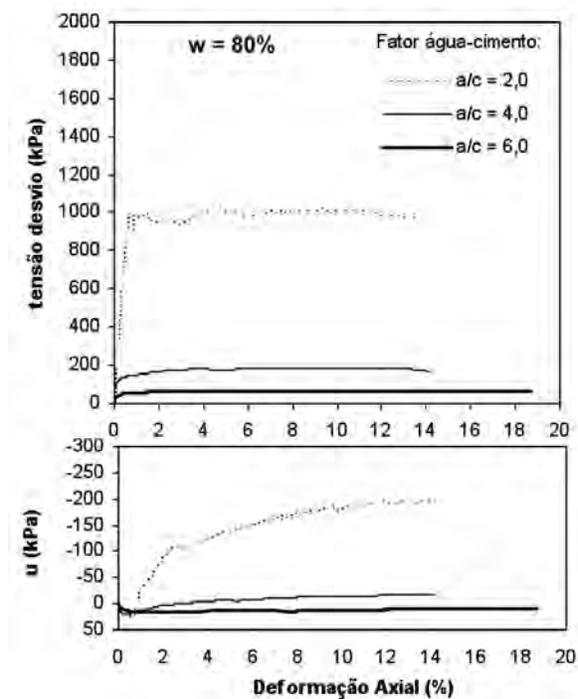


Fig. 5 – Comportamento tensão desvio e poro-pressão vs. deformação axial para as misturas de SCB com teor de bentonita de 6%, com fator a/c 2, 4 e 6 e tensão efetiva de 20kPa.

Analisando as curvas da Fig. 5, com exceção do corpo de prova com  $a/c=2$  e  $w=80\%$ , se verifica que apesar da mudança do teor de umidade não houve uma variação de resistência de ruptura considerável entre as amostras de mesma relação água-cimento. Na Fig. 6 evidencia-se a diferença de resistência ao cisalhamento não drenada existente entre o corpo de prova de  $a/c=2$  e os demais.

Analisando as Figs. 5 e 6, referentes às curvas com  $a/c=2$  e tensão efetiva de 20 kPa, um padrão de comportamento distinto em relação às misturas com  $a/c=4$  e  $a/c=6$  foi verificado: após um aumento de poro-pressão positiva inicial, segue-se uma queda brusca dos valores de poro-pressão indicando que esse material apresenta uma alta rigidez e uma forte tendência dilatante. Após, a taxa de variação da poro-pressão diminui, convergindo para um estado final quase estável correspondente a altos valores de deformações axiais, enquanto que para as misturas com  $a/c=6$  as poro-pressões são sistematicamente crescentes devido à tendência clara de contração do material durante o processo de cisalhamento sob condições não drenadas, sendo que a partir de deformações axiais superiores a 1% as poro-pressões se estabilizam convergindo para um estado final estável em todos os casos.



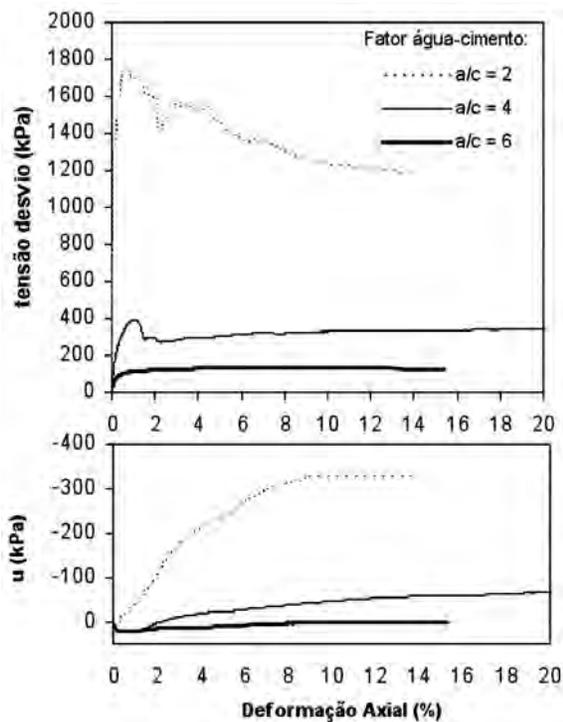
**Fig. 6** – Influência do fator água-cimento no comportamento tensão desvio e poro pressão vs. deformação axial - teor de umidade 80% e tensão efetiva de 20kPa.

### 3.2.2 – Comportamento mecânico - 15 e 18% de bentonita

As curvas tensão vs. deformação axial e variação de poro-pressão vs. deformação axial das misturas com teor de bentonita de 15% estão ilustradas nas Figs. 7 e 8. Analisando a Fig. 7, as curvas tensão vs. deformação axial das amostras de fator água-cimento 2 e 4 apresentaram o comportamento típico de materiais cimentados, ou seja, rígido no início do processo, passando por uma fase linear até atingir um ponto de escoamento, a partir do qual o material experimenta

deformações plásticas ou irreversíveis. A ruptura ocorre em um valor de tensão desvio de pico bem definido. Com relação ao corpo de prova de fator água-cimento 6 não houve a formação de um pico definido (com exceção do ensaio com maior tensão confinante) e a resistência permanece aproximadamente constante até o fim do ensaio.

As curvas variação da poro-pressão vs. deformação axial indicam claramente a existência de dois comportamentos típicos distintos nas amostras. Na amostra de fator água-cimento 2 ocorre um acréscimo de poro-pressão positiva inicial, seguido de uma redução brusca da poro-pressão, indicando tratar-se de um material altamente rígido e com uma forte tendência para dilatar no processo de cisalhamento drenado. Para as amostras de fator água-cimento 4 e 6 o comportamento é parecido ao que ocorre em relação às misturas de fator água-cimento 2, com a diferença que a queda da poro-pressão é muito menos acentuada e ocorre para valores bastante maiores de deformações axiais, indicando tratar-se de materiais muito menos rígidos e com uma tendência bem menor de dilatação.



**Fig. 7** – Influência do fator água-cimento no comportamento tensão e variação de poro-pressão vs. deformação axial – 15% de bentonita, 80% de umidade e tensão efetiva de 20kPa.

As curvas mostrando o comportamento das misturas com teor de bentonita de 18% estão ilustradas na Fig. 9 e na Fig. 10, sendo que os resultados obtidos sobre o comportamento mecânico para esses materiais seguem a mesma tendência que os encontrados para as amostras de teor de bentonita de 15%.

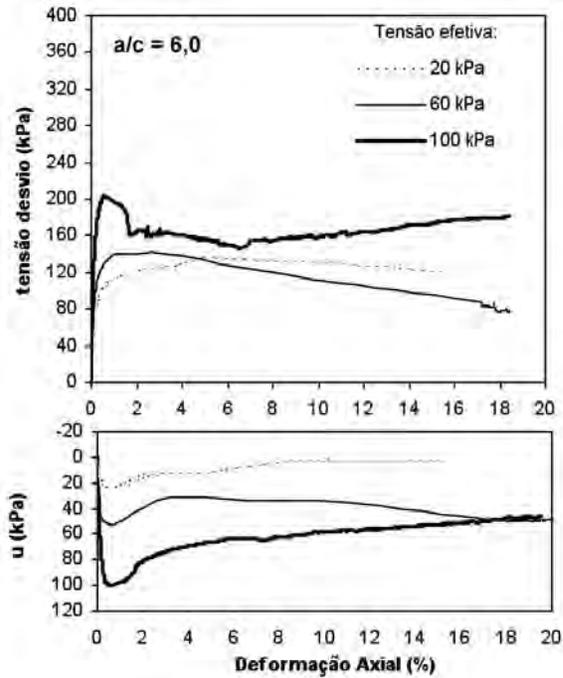


Fig. 8 – Influência da tensão efetiva no comportamento tensão desvio e poro-pressão vs. deformação axial – 15% de bentonita, 80% de umidade e fator a/c 6.

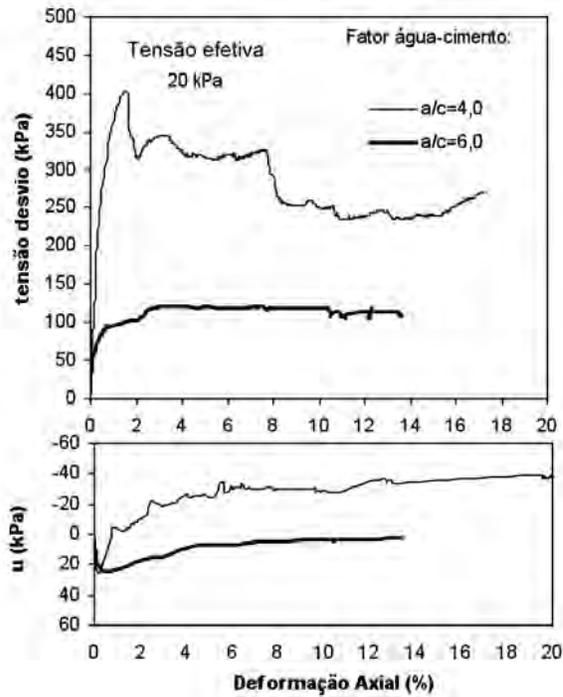
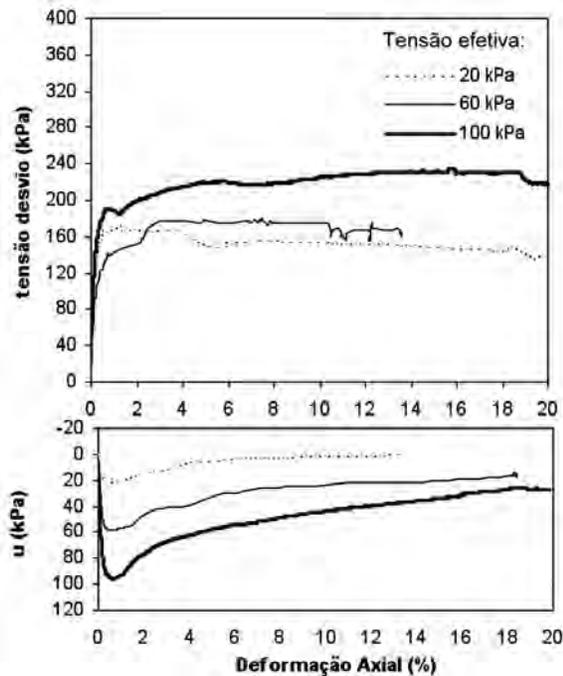


Fig. 9 – Influência do fator a/c no comportamento tensão e variação de poro-pressão vs. deformação axial para uma tensão efetiva de 20 kPa – 18% de teor de bentonita.



**Fig. 10** – Influência da tensão efetiva no comportamento tensão desvio e poro-pressão vs. deformação axial para corpos de prova com a/c 6 e 18% de bentonita.

### 3.3 – Análise global do comportamento mecânico das misturas de SB e SCB

Os resultados que são confrontados neste item têm como objetivo analisar o efeito do cimento no comportamento mecânico dos materiais. As curvas tensão vs. deformação axial e variação de poro-pressão vs. deformação axial das misturas de fator água-cimento 2, 4 e 6 e teor de bentonita de 6, 15 e 18% estão ilustradas nas Figs. 11 e 12.

Da observação da Fig. 11 pode-se concluir que o acréscimo do teor de bentonita acarretou um aumento na resistência ao cisalhamento dos compósitos, independentemente do fator água-cimento analisado. Esse acréscimo de resistência justifica-se pela diminuição dos vazios dentro da estrutura do compósito devido ao aumento do teor de bentonita. Porém, espera-se que a partir do momento em que exista uma estrutura coesa com baixos índices de vazios, a tendência é que a resistência decresça com o aumento do teor de bentonita na amostra. Essa queda de resistência deve-se fundamentalmente à baixa resistência ao cisalhamento e à alta compressibilidade da bentonita. Portanto, a partir de um teor de bentonita superior ao estudado, espera-se que a resistência desses materiais tenda a decrescer com o acréscimo de bentonita no compósito.

Analisando a Fig. 12, verificou-se que a presença de cimento gerou um ganho muito significativo na resistência das amostras. Com relação à presença de cimento na geração de poro-pressão, as curvas mostraram que existe uma mudança de comportamento entre as amostras com fator água-cimento de 4 e 6. Para amostras com fator água-cimento 6, verifica-se uma tendência de contração das misturas, ao passo que para as misturas com fator água-cimento menor que 4 nota-se uma tendência de dilatação devido à geração de poro-pressão negativa, apresentada por estes materiais.

A Fig. 13 mostra a envoltória de resistência de pico das misturas de SCB com fator água-cimento 6, teor de umidade de 80% e teores de bentonita de 6, 15 e 18% apresentadas no

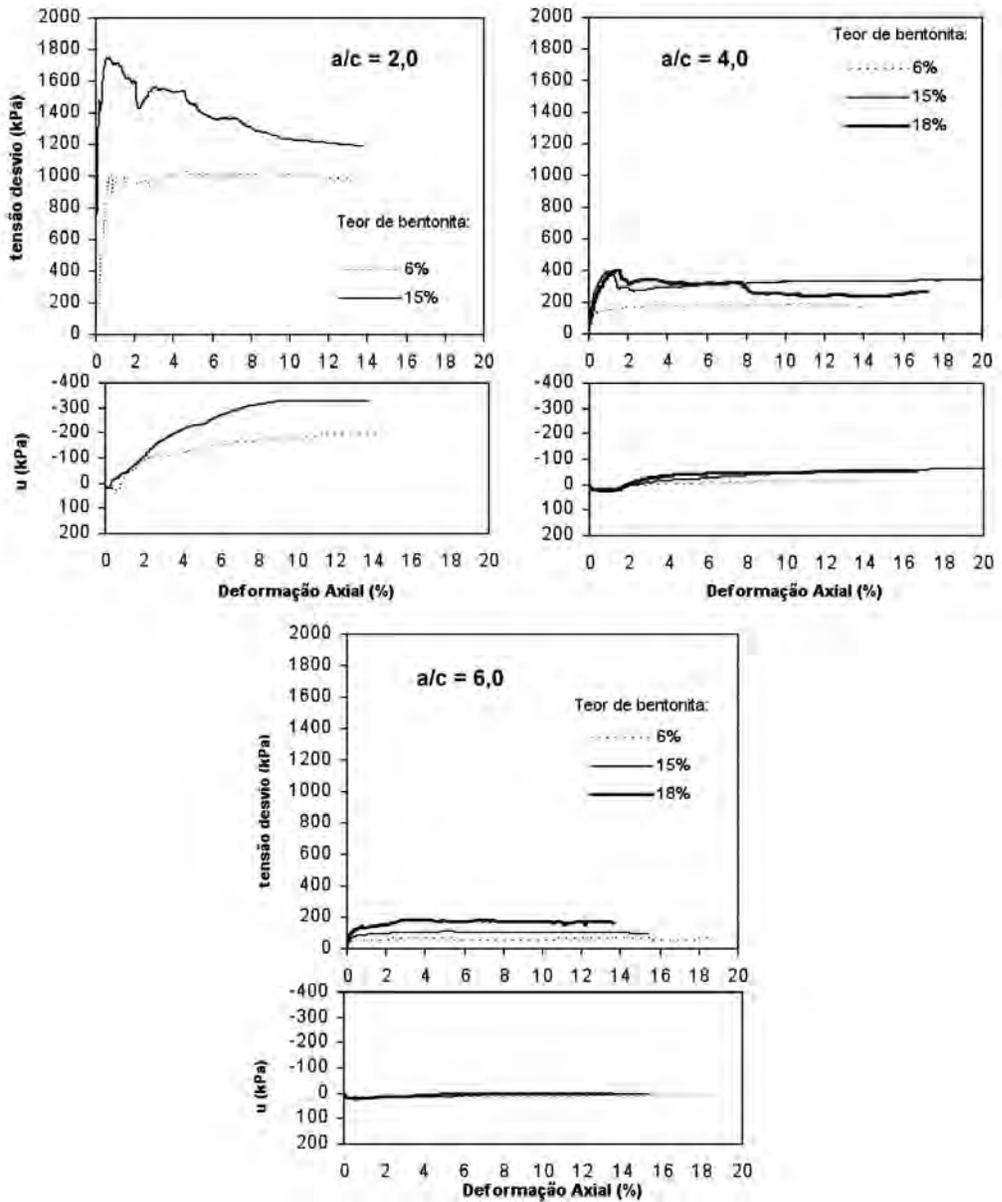


Fig. 11 – Influência do teor de bentonita no comportamento tensão desvio e variação de poro pressão vs. deformação axial das amostras de SCB, com fator a/c 2, 4 e 6 e tensão efetiva de 20 kPa.

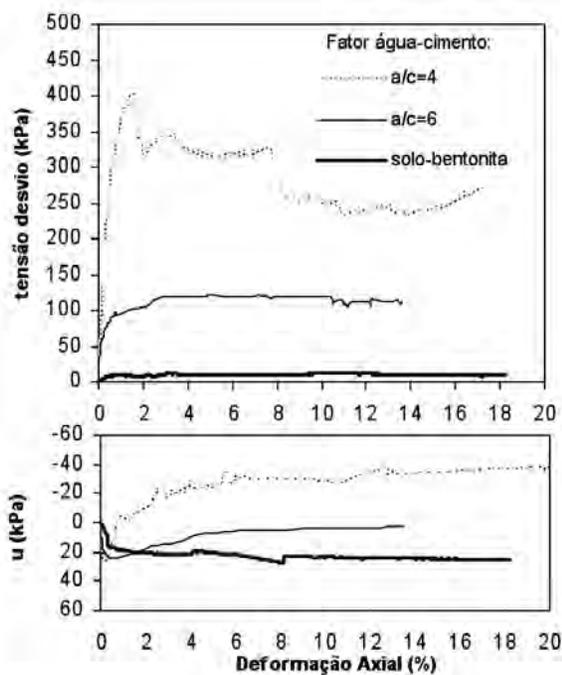
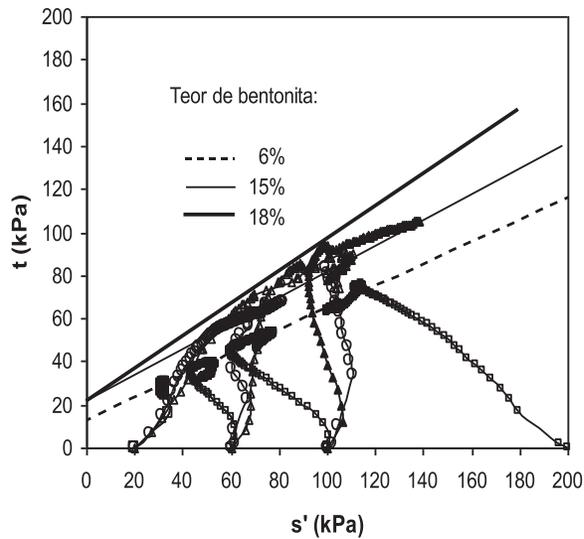


Fig. 12 – Influência da presença de cimento no comportamento tensão desvio e variação de poro-pressão vs. deformação axial das amostras de SCB - 18% de bentonita.

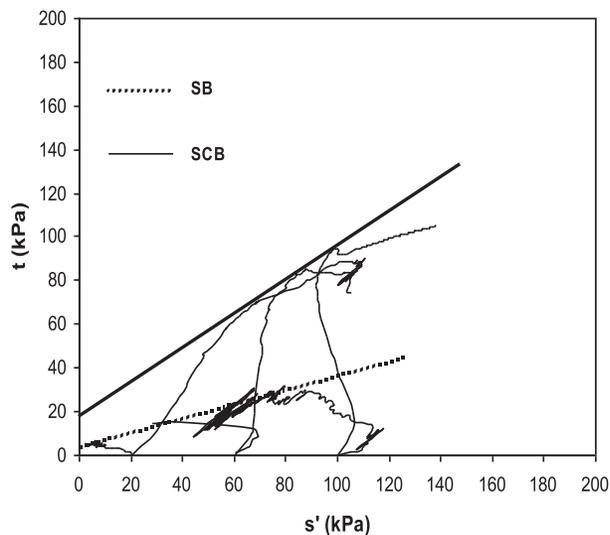
espaço  $s' \times t$ . Já na Fig. 14 são comparadas as envoltórias de SB com 18% de bentonita com a envoltória obtida para as misturas de SCB de fator água-cimento 6 com teor de bentonita de 18%. A influência do teor de bentonita e do fator água-cimento nos parâmetros de resistência está resumida no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros de resistência para as misturas de SB e SCB com  $a/c=6$  e  $w=80\%$ .

Fator água-cimento	Teor de bentonita (%)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
6	6	13,5	27,3
	15	19,0	32,5
	18	19,8	37,0
SB	18	4,3	16,7



**Fig. 13** – Envolvórias de resistência de pico das misturas de SCB com fator água-cimento 6, teor de umidade de 80% e teores de bentonita de 6, 15 e 18%.

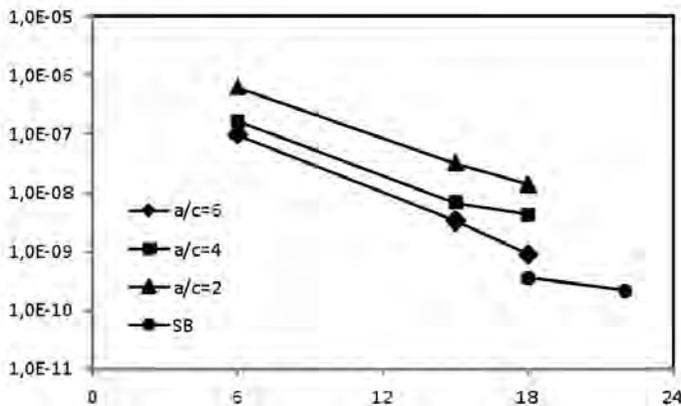


**Fig. 14** – Comparação das envoltórias de ruptura entre as misturas de SB e SCB.

### 3.4 – Comportamento hidráulico das misturas de SB e SCB

Não existe uma norma que regulamente limites mínimos de coeficiente de condutividade hidráulica utilizados como parâmetros de projeto, mas segundo Andromalos e Fisher (2001) a condutividade hidráulica nas barreiras de SCB e SB deve atingir valores inferiores respectivamente a  $10^{-8}$  m/s e  $10^{-9}$  m/s.

O efeito do teor de bentonita e da presença de cimento na condutividade hidráulica das misturas de SB e SCB está ilustrado na Fig. 15. Em todos os casos, o aumento do teor de bentonita



**Fig. 15** – Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica das misturas de SB e SCB para um teor de umidade de 80%.

ocasionou a diminuição da condutividade hidráulica, como esperado. Ainda, nota-se que quanto menor for o fator água-cimento da amostra, maior a condutividade hidráulica das misturas de SCB, independentemente do teor de bentonita utilizado, devido ao aumento da quantidade de cimento.

O resultado das amostras de SB com teores de bentonita de 18% e 22% mostram que a presença do cimento nas misturas aumenta os valores de condutividade hidráulica das amostras cimentadas em relação às amostras não cimentadas e, quanto maior a quantidade de cimento (menor o fator a/c), maior a condutividade hidráulica. Os resultados corroboram o descrito na literatura: Bellezza e Pasqualini (1997) afirmam que a adição de cimento pode provocar valores de condutividade hidráulica maiores ou menores em relação ao solo não tratado. De maneira geral, a condutividade hidráulica é reduzida nos solos granulares, mas pode aumentar nos solos argilosos, conforme observado no presente estudo.

De maneira análoga, Chew *et al.* (2004) observaram o aumento da condutividade hidráulica com a adição de cimento em solos argilosos, o que foi justificado pelos autores pelo fato de que, para uma mesma tensão efetiva e teor de umidade, a mistura contendo cimento possui maior índice de vazios.

De uma maneira geral, as misturas com fator água-cimento 6 e todas com teor de bentonita de 6% mostraram ser bastante permeáveis para a aplicação em barreiras verticais de contaminantes, por apresentarem  $k > 10^{-8}$  m/s.

#### 4 – CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos ensaios laboratoriais realizados neste trabalho e das análises destes resultados foram estabelecidas algumas conclusões.

As resistências ao cisalhamento alcançadas para as misturas de SB foram muito baixas, não ultrapassando o valor de 60 kPa. O acréscimo do teor de bentonita não provocou uma redução na resistência ao cisalhamento de pico para as amostras de SB, o que indica que provavelmente o acréscimo do teor de bentonita levou a uma diminuição do índice de vazios do material.

Para as misturas de SCB, a diminuição do fator água-cimento provocou um aumento na resistência de pico, independentemente do teor de bentonita e do teor de umidade considerados. O acréscimo do teor de bentonita, para o fator a/c=6, causou um aumento na resistência ao cisalhamento de pico para as misturas de SCB. Acredita-se que, para teores maiores, a tendência é que a resistência decresça com o aumento do teor de bentonita nas misturas de SCB, devido à baixa resistência ao cisalhamento e à alta compressibilidade da bentonita.

A diminuição do fator água-cimento, para um mesmo teor de bentonita, provocou um aumento progressivo do ângulo de atrito interno efetivo e do intercepto coesivo, causado pela presença de uma quantidade maior de cimento na amostra. Para as amostras com teor de bentonita de 6% e mesmo fator água-cimento, a variação do teor de umidade não causou uma mudança significativa na resistência ao cisalhamento das misturas.

As amostras de SB apresentaram valores de condutividade hidráulica inferiores aos das misturas de SCB, indicando que a introdução de cimento aumentou a condutividade hidráulica das misturas. Para as amostras cimentadas, quanto menor o fator água-cimento, maior foi a condutividade hidráulica observada. Estas conclusões corroboram o trabalho de Chew *et al.* (2004), onde os autores, ao estudarem o efeito da introdução de cimento em argilas, observaram o aumento da condutividade hidráulica das amostras cimentadas em relação às não cimentadas.

O aumento do teor de bentonita, para um mesmo fator água-cimento, causou uma diminuição da condutividade hidráulica dos materiais. As misturas SB com teores de bentonita de 18 e 22% apresentaram coeficientes de condutividade hidráulica inferiores aos usualmente utilizados como parâmetros de projeto. As misturas de fator água-cimento 2, 4 e 6 e teor de bentonita de 6% mostraram ser bastante permeáveis para a aplicação em barreiras verticais de contaminantes. De maneira geral, as misturas de SCB com  $a/c = 2$  e 4 e teor de bentonita de 15 e 18% podem ser utilizados em barreiras para a contenção de contaminantes, por possuírem condutividades hidráulicas inferiores a  $10^{-8}$ m/s.

## 5 – AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq (Projetos Produtividade em Pesquisa 307993/2014-0 e Edital Universal 441471/2014-5) pelo apoio financeiro ao grupo de pesquisa.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andromalos, K.B.; Fisher, M.J. (2001). *Design and Control of Slurry Wall Backfill Mixes for Groundwater Containment*. In: International Containment and Remediation Conference. Orlando. Disponível em: <http://www.containment.fsu.edu/cd/content/pdf/041.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2004.
- ASTM D 2487 (1993). *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia. 11p.
- Bellezza, I.; Pasqualini, E. (1997). *Hydraulic performance of soil-cement liners*. Proceedings of GeoEnvironment 97. Bouazza, Kadikara & Parker (Eds.). Balkema, Rotterdam. pp. 271-276.
- Bishop, A.W.; Henkel, D.J. (1962). *The measurement of soil properties in the triaxial test*. London: Edward Arnold, 2nd ed., 277p.
- Bouazza, A.; Manassero, M.; Smith, N. (1999). *Cement-bentonite Slurry Walls for Waste Containment* [online]. In: N.D. Vitharana e R. Colman (Eds.). Proceedings of 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics: Consolidating Knowledge. Barton, ACT: Australian Geomechanics Society, pp. 679-684.
- Chew, S.H.; Kamruzzaman, A.H.M.; Lee, F.H. (2004). *Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(7), pp. 696-706.
- Clayton, C.R.I.; Khatrush, S.A. (1986). *A new device for measuring local axial strain on triaxial specimens*. Géotechnique, London, v.25, n.4, pp. 657-670.

- Clayton, C.R.I.; Khatrush, S.A.; Bica, A.V.D.; Siddique, A. (1989). *The use of Hall effect semiconductor in geotechnical instrumentation*. Geotechnical Testing Journal, v.12, n.1, pp. 69-76.
- D'Appolonia, D.J. (1980). *Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs*. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE, v.107, no. 4, pp. 399-417.
- Evans, J.C. (1994). *Hydraulic conductivity of vertical cutoff walls*. In: D.E. Daniel and S.J. Trautwein (Eds.). Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP 1142, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Evans, J.C. (1993). *Vertical cutoff walls*. In: D.E. Daniel (Ed.). Geotechnical Practice for Waste Disposal. London: Chapman & Hall. Ch. 17, pp. 430-454.
- Gaucher, E.C.; Blanc, P. (2006). *Cement/clay interactions – a review: experiments, natural analogues, and modeling*. Waste Management, 26(7), pp. 776-788.
- Head, K.H. (1980). *Manual of Soil Laboratory Testing. Vol 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*. London: Pentech Press. 402p.
- Heineck, K.S. (2002). *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis*. Tese de doutorado. PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil. 251p.
- Horpibulsuk, S.; Miura, N.; Nagaraj, T.S. (2005). *Clay-water/cement ratio identity for cement admixed soft clays*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(2), pp. 187-192.
- Jefferis, S. (2012). *Cement-Bentonite Slurry Systems*. In: LF. Johnsen *et al.* (Eds.), Grouting and Deep Mixing 2012, pp. 1-24. doi: 10.1061/9780784412350.0001.
- LaGrega, M.D.; Buckingham, P.L.; Evans, J.C. (1994). *Hazardous waste management*. McGraw-Hill, 1146 p.
- Lorenzo, G.A.; Bergado, D.T. (2004). *Fundamental parameters of cement admixed clay - new approach*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(10), pp. 1042-1050.
- NBR 6502 (1995). *Rochas e solos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro. 18p.
- Opdike, S.M.; Evans, J.C. (2005). *Slag-cement-bentonite slurry walls*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, v. 131, no. 6, pp. 673-681.
- Pearlman, L. (1999). *Subsurface Containment and Monitoring Systems: Barriers and Beyond*. Disponível em: [www.slurrywall.com/articles/4.pdf](http://www.slurrywall.com/articles/4.pdf). Acesso: 10 dez. 2003.
- Read, D.; Glasser, F.P.; Ayora, C.; Guardiola, M.T.; Sneyers, A. (2001). *Mineralogical and microstructural changes accompanying the interaction of Boom Clay with ordinary Portland cement*. Advances in Cement Research, 13(4), 175-183.
- Ryan, C.; Spaulding, C. (2008). *Strength and Permeability of a Deep Soil Bentonite Slurry Wall*. GeoCongress 2008, pp. 644-651. doi: 10.1061/40970(309)81.
- Skempton, A.W. (1954). *The pore-pressure coefficients A and B*. Géotechnique, London, v.4, pp. 143-147.
- Xanthakos, P.P. (1979). *Slurry Walls*. New York: McGraw-Hill. 622p.